

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**HELIANA MARIA CEBALLOS AGUILAR**

**DESEMPENHOS TÉRMICO E ENERGÉTICO DE UMA  
EDIFICAÇÃO NA REGIÃO AMAZÔNICA BRASILEIRA**

TD 11 / 2018

**UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
2018**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**HELIANA MARIA CEBALLOS AGUILAR**

**DESEMPENHOS TÉRMICO E ENERGÉTICO DE UMA  
EDIFICAÇÃO NA REGIÃO AMAZÔNICA BRASILEIRA**

Tese submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA para a obtenção do Grau de Doutora em Engenharia Elétrica na área de Sistemas de Energia

**UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
2018**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

A283d      Aguilar, Heliana Maria Ceballos  
Desempenhos Térmico e Energético de uma Edificação na Região Amazônica Brasileira / Heliana Maria Ceballos Aguilar. — 2018  
186 f. : il. color

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.  
Orientação: Prof. Dr. João Tavares Pinho

1. Edificações Eficientes. 2. Desempenho Térmico. 3. Desempenho Energético. 4. Energia Solar. 5. Análise Econômica. I. Pinho, João Tavares, *orient.* II. Título

CDD 333.7923

---

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**“DESEMPENHOS TÉRMICO E ENERGÉTICO DE UMA EDIFICAÇÃO  
NA REGIÃO AMAZÔNICA BRASILEIRA”**

AUTORA: **HELIANA MARIA CEBALLOS AGUILAR**

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO  
COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO  
JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTORA EM ENGENHARIA  
ELÉTRICA NA ÁREA DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA.

APROVADA EM: 06/09/2018

**BANCA EXAMINADORA:**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. João Tavares Pinho**  
(Orientador – UFPA)

  
\_\_\_\_\_  
**Prof.ª Dr.ª Maria Emília de Lima Tostes**  
(Avaliadora Interna – PPGEE/UFPA)

  
\_\_\_\_\_  
**Prof.ª Dr.ª Ana Kláudia de Almeida Viana Perdigão**  
(Avaliadora Externa ao Programa – FAU/UFPA)

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Marcos André Barros Galhardo**  
(Avaliador Externo ao Programa – FEEB/UFPA)

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Alaán Ubajara Brito**  
(Avaliador Externo – UNIFAP)

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. George Alves Soares**  
(Avaliador Externo – ELETROBRÁS)

**VISTO:**

\_\_\_\_\_  
**Prof.ª Dr.ª Maria Emília de Lima Tostes**  
(Coordenadora do PPGEE/ITEC/UFPA)

Dedicatória

A mis padres, Maria Fany y José Gustavo: mi luz, mi guía (*in memoriam*)

A Eunice, Cristina y Camilo: mi alegría

A mi familia: mi puerto.

## AGRADECIMENTOS

Dedico meus sinceros agradecimentos para:

O Professor Dr.-Ing. João Tavares Pinho, pela amizade, paciência e orientação.

O meu grande amigo Marcos Galhardo, com eterna gratidão.

A “Diretoria” do GEDAE, pelos anos de ajuda e companhia.

Existem pessoas que tornam a nossa caminhada mais significativa, pela companhia, pelo apoio, pelo carinho e porque nos tornam melhores... Tania, Dalvany, Lilian, Rodrigo, Daniel, Luciana, Bruna, Adriano (sempre), Leslye, Yapur, Sebastian, Rosi... pela força a cada passo!

Franciane, Ivanize, Jeane, Kellen: mil vezes obrigada; sem vocês não teria sido tão feliz!

A todos os membros do GEDAE, pela ajuda, café e momentos de descontração: Obrigada!

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO .....	1
1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. NORMAS, ESTRATÉGIAS E FERRAMENTAS.....	9
1.1 LEGISLAÇÃO SOBRE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES.....	9
1.1.1 Instrumentos de Avaliação. Regulamentos e Normas sobre Edificações.....	9
1.1.2 Ações .....	13
1.1.3 Normas e Regulamentação Brasileiras .....	15
1.2 Edificações Eficientes.....	20
1.2.1 Edificações Solares Fotovoltaicas .....	22
1.3 COMPORTAMENTO TÉRMICO DAS EDIFICAÇÕES.....	31
1.3.1 Cargas Térmicas .....	31
1.3.2 Efeitos Térmicos de Materiais e Sistemas.....	37
1.4 SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO E ENERGÉTICO .....	39
1.4.1 Programas de Simulação. Características e Utilidades.....	42
1.4.2 Panorama Nacional.....	48
1.5 SIMULAÇÕES PARA O CASO EM ESTUDO.....	51
1.5.1 Simulação Termo-energética.....	51
1.5.2 Simulação do Comportamento Lumínico.....	52
1.6 PROCESSO DE CALIBRAÇÃO.....	53
1.7 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO .....	54
2 ESTUDO DE CASO. LABORATÓRIO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	55
2.1 LOCALIZAÇÃO E CLIMATOLOGIA.....	55
2.1.1 Localização.....	55
2.1.2 Análise Climática .....	56
2.1.3 Caracterização das Condições Climáticas da Região Amazônica.....	57
2.1.4 Características construtivas .....	61
2.2 CARACTERIZAÇÃO DA EDIFICAÇÃO.....	62
2.2.1 Geometria .....	63
2.2.2 Orientação.....	67
2.2.3 Materiais Construtivos.....	67
2.2.4 Cargas externas.....	71
2.2.5 Cargas Internas .....	72

2.3	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO .....	74
3	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA EDIFICAÇÃO - MEDIDAS DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA .....	77
3.1	ANÁLISE DINÂMICA.....	77
3.1.1	Validação e Calibração.....	78
3.1.2	Validação do Programa .....	79
3.1.3	Dados Meteorológicos.....	79
3.1.4	Validação do Modelo.....	80
3.1.5	Medições e Simulações .....	83
3.1.6	Consolidação do Modelo.....	89
3.2	MEDIDAS DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA - MCE.....	90
3.2.1	MCE-01 - Iluminação Natural.....	90
3.2.2	MCE-02 - Isolantes Térmicos e Câmara de Ar .....	98
3.2.3	MCE-03 - Iluminação Natural e Isolamento Térmico.....	105
3.2.4	MCE-04 - Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede .....	106
3.3	SFCR E PRODUÇÃO DE ENERGIA .....	122
3.3.1	Análise de Energia Térmica .....	123
3.3.2	Impactos das MCE e Economia de Energia Elétrica.....	127
3.3.3	Energia Produzida e Balanço Geral.....	130
3.3.4	Outros Sistemas .....	132
3.4	ANÁLISE ESTÁTICA.....	133
3.4.1	Determinação do Nível de Eficiência Energética.....	134
3.4.2	Classificação Geral .....	140
3.5	PROPOSTA PARA MELHORAR O DESEMPENHO .....	140
3.5.1	Instalação dos sistemas fotovoltaicos na cobertura da edificação .....	140
3.6	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO .....	142
4	ANÁLISE ECONÔMICA .....	143
4.1	VARIÁVEIS ECONÔMICAS .....	143
4.1.1	Cálculo Tarifário.....	143
4.1.2	Indicadores de Desempenho Econômico.....	145
4.2	CUSTO DE OBRA CIVIL.....	145
4.2.1	Análise de Custos das MCE .....	146
4.3	ECONÔMIA MONETÁRIA.....	149
4.3.1	Economia com Iluminação Natural .....	149
4.3.2	Economia com Isolante Térmico.....	150

4.3.3 Economia Conjunta com MCE-01 e MCE-02.....	151
4.3.4 Economia com Sistemas Fotovoltaicos .....	152
4.4 SIMULAÇÃO PARA AS CAPITAIS DA AMAZÔNIA LEGAL BRASILEIRA 155	
4.4.1 Custo de Obra Civil .....	156
4.4.2 Custo de Energia Elétrica .....	156
4.5 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO .....	160
CONCLUSÕES .....	162
REFÊRENCIAS .....	166

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i> (Associação Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado)
BAPV	<i>Building-Applied Photovoltaics</i> (Fotovoltaica Adaptada à Edificação)
BEC	<i>Building Energy Codes</i> (Normas Energéticas em Edificações)
BEMP	<i>Building Energy Modelling Program</i> (Programa para Modelagem Energética de Edificações)
BIPV	<i>Building-Integrated Photovoltaics</i> (Fotovoltaica Integrada à Edificação)
CBI	<i>Energy Commercial Building Initiative</i> (Iniciativa para Edificações Comerciais com Energia Net-Zero)
DA	<i>Daylight Autonomy</i> (Autonomia de Luz Natural)
DDY	<i>Date Design Day</i> (Dia de Projeto)
DF	<i>Daylight Factor</i> (Fator de Luz Natural)
EEE	Eficiência Energética de Edificações
EFCR	Edificação Fotovoltaica Conectada à Rede
ENCE	Etiqueta Nacional de Conservação de Energia
EqNum	Equivalente Numérico
EUA	Estados Unidos de América
GEDAE	Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas
HVAC	<i>Heating, Ventilation and Air Conditioning</i> (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado)
IC	Índice de Consumo
IES	<i>Illuminating Engineering Society</i> (Sociedade de Engenheiros em Iluminação)
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia

LEB	<i>Low Energy Building</i> (Edificação de Baixo Consumo de Energia)
LEED	<i>Leadership in Energy and Environmental Design</i> (Sistema de certificação e orientação ambiental de edificações)
MCE	Medida de Conservação de Energia
MME	Ministério de Minas e Energia
NZEB	<i>Nearly Zero Energy Building</i> (Edificação com consumo de energia quase nulo)
nZEB	<i>Net Zero Energy Building</i> (Edificação com consumo de energia nulo)
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
PNE	Plano Nacional de Energia
PNEf	Plano Nacional de Eficiência Energética
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
RTQ-C	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicos
RTQ-R	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais
RAC	Requisitos de Avaliação da Conformidade
SINAPI	Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil
SRR	Relação abertura zenital/telhado
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
UDI	<i>Useful Daylight Illuminance</i> (Iluminância Natural Útil)
UC	Unidade Consumidora
WWR	Relação Janela/Parede
ZEB	<i>Zero Emissions Building</i> (Edificação sem emissões de CO <sub>2</sub> )

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Zoneamento Bioclimático Brasileiro. Fonte: ABNT-15220. ....	17
Figura 1.2. Etiqueta Nacional de Conservação de Energia em Edificações. Fonte: RTQ-C. .....	19
Figura 1.3. Configuração de um sistema conectado à rede. ....	25
Figura 1.4. Formas de integração a adaptação à arquitetura. ....	26
Figura 1.5. Tipos de instalações BIPV em edificações. Fonte: SOLARNOVA (2017). ....	28
Figura 1.6. Tipos de instalação BAPV em edificações. Fonte: SOLARNOVA (2017). ....	29
Figura 1.7. Fatores considerados em trocas térmicas de calor. ....	33
Figura 1.8. Mecanismos de transmissão de calor em edificações. ....	33
Figura 1.9. Diagrama de blocos para simulação. ....	41
Figura 2.1. Localização da edificação no Campus Universitário. Fonte: Adaptada de Google Earth. ....	55
Figura 2.2. Mapa com irradiação global horizontal. Fonte: Adaptado de (INPE, 2017). ....	58
Figura 2.3. Condições climáticas para o dia considerado mais quente nas capitais. Fonte: Dados do LABEEE (2015). ....	58
Figura 2.4. Características climáticas de Belém. Fonte: Adaptada de CLIMATE 6.0. ....	60
Figura 2.5. Carta bioclimática para a cidade de Belém. Fonte: AGUILAR (2004). ....	61
Figura 2.6. Ateliê de Arquitetura e Restaurante Universitário. Fonte: SARQUIS (2011)...	62
Figura 2.7. Perspectiva do modelo da edificação. ....	64
Figura 2.8. Zonas térmicas da área construída da edificação. ....	64
Figura 2.9. Zonas térmicas da área em projeto da edificação. ....	66
Figura 2.10. Orientação do edifício (planta) e a influência dos ventos. ....	67
Figura 2.11. Fachada norte da edificação. ....	67
Figura 2.12. Composição das paredes. ....	68
Figura 2.13. Composição das coberturas. ....	69
Figura 2.14. Cobertura da edificação, com detalhes da iluminação zenital em destaque. ...	69
Figura 2.15. Janelas típicas da edificação. ....	70

Figura 2.16. Níveis de irradiação nas superfícies da Z11. ....	71
Figura 2.17. Perfis de uso da edificação. Fonte: Medições <i>in loco</i> . ....	73
Figura 2.18. Instalação das luminárias. ....	73
Figura 3.1. Estação Meteorológica próxima à edificação. ....	80
Figura 3.2. Volume da área construída da edificação. ....	81
Figura 3.3. Diferenças de temperatura com e sem calcular o contato com o solo. ....	82
Figura 3.4. Projeções solares na fachada sul (esq. edificação - dir. modelo). ....	82
Figura 3.5. Projeções solares na fachada norte (esq. modelo - dir. edificação). ....	83
Figura 3.6. Medidores de temperatura e umidade. ....	84
Figura 3.7. Curvas de temperatura interna medida e simulada para as Z03 e Z13. ....	84
Figura 3.8. Computador que gerencia a rede Modbus e medidores instalados no quadro geral de distribuição. ....	85
Figura 3.9. Consumo de energia simulado e medido para o dia típico de novembro. ....	86
Figura 3.10. Consumo de energia em equipamentos para o DDY. ....	87
Figura 3.11. Consumo de energia em condicionamento de ar. ....	88
Figura 3.12. Dados de demanda de potência elétrica ativa do aparelho de condicionamento de ar da Z11. ....	88
Figura 3.13. Volumetria do modelo base. ....	89
Figura 3.14. Volumetria do modelo M_01 com MCE-01 aplicada. ....	91
Figura 3.15. Comparação de curvas de autonomia de luz natural nas 5 zonas do M_01. ....	93
Figura 3.16. Pontos com luminosidade superior a 500 lux na Z11 para o dia 21/06. ....	96
Figura 3.17. Consumo nos dias de projeto com iluminação artificial. ....	97
Figura 3.18. Consumo anual nas zonas exemplificadas. ....	97
Figura 3.19. Consumo mensal com iluminação artificial. ....	98
Figura 3.20. MEC-02. Isolante térmico e câmara de ar. ....	99
Figura 3.21. Comparação de temperatura operativa na zona Z04 nos dias 21/02 e 21/11. ....	100
Figura 3.22. Comparação de temperatura operativa da zona Z11 nos dias 21/02 e 21/11. ....	100
Figura 3.23. Comparação de temperatura de superfície interna da parede na zona Z04 nos dias 21/02 e 21/11. ....	101
Figura 3.24. Comparação de temperatura de superfície da parede na zona Z11 nos dias 21/02	

e 21/11. ....	101
Figura 3.25. Comparação de temperatura de superfície interna da cobertura na zona Z04 nos dias 21/02 e 21/11. ....	101
Figura 3.26. Temperatura de superfície interna da cobertura da zona Z11 nos dias 21/02 e 21/11. ....	102
Figura 3.27. Cargas térmicas máximas (sensível e latente) para resfriamento. ....	103
Figura 3.28. Cargas térmicas totais mensais para resfriamento. ....	103
Figura 3.29. Consumo de energia em condicionamento de ar nos DDY. ....	104
Figura 3.30. Consumo mensal em condicionamento de ar antes e depois da MCE-02. ....	104
Figura 3.31. Diferenças de consumo com as medidas aplicadas. ....	106
Figura 3.32. Vista aérea da área externa do Laboratório. Fonte: Adaptada do GoogleEarth. ....	107
Figura 3.33. Energia elétrica ativa produzida pelo S01 comparada com os dados simulados. ....	110
Figura 3.34. Energia elétrica ativa produzida pelo S02, comparado com os dados simulados. ....	112
Figura 3.35. Energia elétrica ativa produzida pelo S03, comparada com os dados simulados. ....	113
Figura 3.36. Energia elétrica ativa produzida pelo S04, comparada com os dados simulados. ....	114
Figura 3.37. Energia elétrica ativa produzida pelo S05 comparada com os dados simulados. ....	115
Figura 3.38. Energia elétrica ativa produzida pelo S06, comparada com os dados simulados. ....	117
Figura 3.39. Energia elétrica ativa produzida pelo S07, comparada com os dados simulados. ....	118
Figura 3.40. Energia elétrica ativa produzida pelo S08 comparada com os dados simulados. ....	120
Figura 3.41. Energia elétrica gerada pelo S09 obtida por simulação. ....	121
Figura 3.42. Energia elétrica produzida pelo S10 segundo o método de simulação. ....	121
Figura 3.43. Energia elétrica simulada para o S11. ....	122
Figura 3.44. Total mensal de geração de energia pelos sistemas instalados. ....	123

Figura 3.45. Projeção de sombras sobre a parede norte.....	125
Figura 3.46. Irradiação incidente sobre as superfícies da fachada norte.....	125
Figura 3.47. Temperaturas operativa e de superfície após instalação do S02 na zona Z12. .....	126
Figura 3.48. Cargas térmicas do dia 21/06 antes e depois do SFCR. ....	127
Figura 3.49. Demanda elétrica em HVAC para dos dois casos. ....	129
Figura 3.50. Consumo mensal de energia elétrica dos modelos. ....	129
Figura 3.51. Consumo dividido em uso final por modelo.....	129
Figura 3.52. Energia consumida por uso final pelo M_02 e geração dos SFCR. ....	130
Figura 3.53. Balanço de energia nos modelos M_01 e M_02.....	131
Figura 3.54. Economia de energia nos modelos M_01 e M_02.....	131
Figura 3.55. Proposta de instalação dos módulos fotovoltaicos nas coberturas. ....	141
Figura 3.56. Consumo de energia em HVAC dos modelos com SFCR na cobertura. ....	141
Figura 4.1. VPL para a medida de aproveitamento de iluminação natural. ....	153
Figura 4.2. VPL para a medida de isolamento térmico.....	154
Figura 4.3. VPL para o conjunto de medidas de iluminação e isolamento. ....	154
Figura 4.4. VPL para as medidas aplicadas em conjunto, incluindo BAPV e BIPV.....	154
Figura 4.5. VPL para as medidas aplicadas em conjunto, com desconto da energia produzida. .....	155
Figura 4.6. VPL para o cenário 6 em três capitais. ....	159
Figura 4.7. Simulação para as nove capitais da Região Amazônica Brasileira. ....	160

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1. Diferenças entre centrais fotovoltaicas e EFCR.....	26
Tabela 1.2. Elementos do BLAST e do DOE-2 no EnergyPlus.....	47
Tabela 1.3. Dados climatológicos das cidades capitais. Fonte: Arquivo climático do (LABEEE, 2015). .....	59
Tabela 2.1. Zonas térmicas da área construída e suas características. ....	65
Tabela 2.2. Zonas térmicas da área em projeto e suas características.....	66
Tabela 2.3. Características dos materiais translúcidos e transparentes. ....	70
Tabela 2.4. Propriedades dos componentes do envelope.....	70
Tabela 2.5. Especificações dos sistemas de condicionamento de ar.....	75
Tabela 2.6. Resumo dos componentes de fluxo de calor analisados. ....	76
Tabela 3.1. Diferenças de aberturas após a aplicação da MCE-01. ....	91
Tabela 3.2. Zonas escolhidas e características. ....	94
Tabela 3.3. Características dos componentes da envoltória nos dois casos.....	99
Tabela 3.4. SFCR instalados no Laboratório. ....	108
Tabela 3.5. Especificações técnicas do módulo FV utilizado no S01.....	110
Tabela 3.6. Especificações técnicas do inversor utilizado no S01.....	110
Tabela 3.7. Especificações técnicas do módulo FV utilizado no S02.....	111
Tabela 3.8. Especificações técnicas do inversor utilizado no S02.....	111
Tabela 3.9. Características do módulo usado no S03.....	112
Tabela 3.10. Características do módulo usado no S04. ....	113
Tabela 3.11. Características do módulo usado no S05. ....	114
Tabela 3.12. Especificações técnicas do inversor utilizado no S05.....	115
Tabela 3.13. Características do módulo usado no S06. ....	116
Tabela 3.14. Especificações técnicas do inversor utilizado no S06.....	116
Tabela 3.15. Características dos módulos usados no S07.....	117
Tabela 3.16. Especificações técnicas do inversor da FRONIUS utilizado no S07. ....	118
Tabela 3.17. Características do módulo usado no S08. ....	119

Tabela 3.18. Especificações técnicas do inversor PHB utilizado no S08. ....	119
Tabela 3.19. Características do módulo usado no S09. ....	120
Tabela 3.20. Características do módulo usado no S11. ....	122
Tabela 3.21. Propriedades termo-físicas dos componentes de um módulo fotovoltaico. ...	124
Tabela 3.22. Dados gerais para os dias 21/02 e 21/11. ....	128
Tabela 3.23. Características da edificação nos dois modelos. ....	135
Tabela 3.24. Variáveis para determinar o IC da envoltória do M_01 e M_02. ....	135
Tabela 3.25. Transmitância das paredes e coberturas dos modelos. ....	136
Tabela 3.26. Potência instalada e potência limite de cada atividade. ....	137
Tabela 3.27. Classificação dos equipamentos de condicionamento de ar. ....	138
Tabela 4.1. Tarifas praticadas para UC-19 (06/2018). Fonte: DINFRA – Infraestrutura – UFPA. ....	144
Tabela 4.2. Resumo dos custos de obra da área construída e área projetada para o ano 2017. ....	146
Tabela 4.3. Economia com isolante térmico. ....	150
Tabela 4.4. Economia com o uso de isolante térmico e iluminação natural. ....	151
Tabela 4.5. Economia com o conjunto de MCE aplicadas. ....	152
Tabela 4.6. Economia com energia produzida. ....	153
Tabela 4.7. Custo total da obra civil e MCE. ....	156
Tabela 4.8. Resumo dos cenários simulados para 9 capitais da Amazônia Legal Brasileira. ....	157

## RESUMO

### DESEMPENHOS TÉRMICO E ENERGÉTICO DE UMA EDIFICAÇÃO NA REGIÃO AMAZÔNICA BRASILEIRA

Neste trabalho é estudada uma proposta inovadora de integração de várias estratégias para diminuir o consumo de energia, onde é avaliado o impacto de cada uma delas individualmente, e todas em conjunto, nos comportamentos térmico, energético e econômico de uma edificação localizada na Região Amazônica Brasileira. Esta região é caracterizada climaticamente pelas altas temperaturas e umidade, onde alcançar condições adequadas de conforto implica em um alto consumo de energia com sistemas de condicionamento de ar.

Diferentes Medidas de Conservação de Energia são avaliadas, com o objetivo de alcançar um melhor aproveitamento da iluminação natural; diminuir as cargas térmicas para resfriamento, onde se considera a instalação de um material isolante térmico nas paredes leste e oeste, e de um isolante térmico e câmara de ar na cobertura, que são as superfícies externas que recebem maior radiação solar na edificação; e também vários sistemas de geração fotovoltaica, sendo que um dos sistemas está integrado como elemento arquitetônico e outro está adaptado sobre a cobertura da edificação.

Na edificação são realizados dois tipos de análise: dinâmica e estática. Para a análise dinâmica utiliza-se o programa EnergyPlus, para conhecer seu comportamento térmico e de consumo de energia analisados para o ano inteiro e para os dias de projeto, e o programa Daysim/Radiance para conhecer a autonomia de iluminação natural alcançada, para tanto usando-se dados medidos por uma estação meteorológica instalada no local. Com relação à análise estática, é avaliado o nível de eficiência energética da edificação pelo método prescritivo segundo a regulamentação nacional vigente.

Posteriormente, a mesma edificação é simulada para as nove capitais dos estados da Região Amazônica Legal Brasileira, com o intuito de conhecer o comportamento energético e a viabilidade econômica em resposta às características climáticas e tarifas de energia elétrica de cada cidade.

Com as avaliações realizadas determina-se que as Medidas de Conservação de Energia (MCE) têm influência direta e significativa sobre a diminuição da carga térmica para resfriamento, pela redução dos efeitos da radiação, com o sombreamento nos beirais e a redução da transmitância das superfícies tratadas. Comprova-se também a possibilidade de maximizar a iluminação natural em espaços internos, para melhorar o conforto dos usuários, possibilitando seu melhor desempenho e economia em energia usada em iluminação artificial.

Em termos de consumo de energia e viabilidade econômica, as MCE alcançam uma

economia energética anual de até 52 % na edificação tomada como estudo de caso, e as soluções adotadas apresentam retorno do investimento financeiro, mostrando-se também adequadas para a economia de energia e viáveis economicamente em regiões com características climáticas similares.

Palavras-chave: Edificações eficientes; Desempenho térmico; Desempenho energético; Energia solar; Análise econômica.

## ABSTRACT

### **THERMAL AND ENERGETIC PERFORMANCE OF A BUILDING IN THE BRAZILIAN AMAZON REGION**

This work presents an innovative proposal of integration of several strategies to reduce energy consumption, where the impact of each one of them is evaluated individually, and all together, in the thermal, energetic and economic performance of a building located in the Brazilian Amazon Region. High temperature and humidity characterize this region climatically, where achieving adequate comfort conditions implies a high demand for energy for air conditioning systems.

Different Energy Conservation Measures are evaluated in order to achieve a better use of daylighting; and to reduce thermal loads for cooling, with the installation of a thermal insulation material in the eastern and western walls, and a thermal insulation and air chamber in the roof, which are the external surfaces that receive higher solar radiation in the building. Additionally, various photovoltaic generation systems are considered, one of which is integrated as an architectural element and another adapted on the roof of the building.

In the building, two types of analysis are conducted: dynamic and static. For the dynamic analysis, the EnergyPlus software is used to know its thermal and energy consumption performances, analyzed for the entire year and for the design day, and the Daysim/Radiance software to know the autonomy of daylighting attained, using data measured with an on-site meteorological station. Concerning the static analysis, the level of energy efficiency is evaluated by the prescriptive method according to the current national regulations.

Subsequently, the same building is simulated for the nine capital cities of the states of the Legal Brazilian Amazon Region, with the aim of knowing its energetic performance and the economic feasibility depending on the climatic characteristics and electrical energy tariffs of each city.

With the assessments performed, it is determined that the ECM have a direct and significant influence on the reduction of the thermal load for cooling, through the reduction of radiation effects, the shading in the eaves and the reduction of the transmittance of the surfaces treated. The possibility of maximizing the daylight in internal spaces, to improve the comfort of the users is also verified, allowing better performance and energy savings with artificial lighting.

In terms of energy consumption and economic feasibility, the ECM achieve an annual energy savings of 52 % in the building taken as a case study, and the solutions adopted show a good return on financial investment, and are also suitable for energy saving and economically feasible in

regions with similar climatic characteristics.

Keywords: Efficient buildings; Thermal performance; Energetic performance; Solar energy; Economic analysis.

# INTRODUÇÃO

## Visão Geral

Os esforços para reduzir o consumo de energia destacam-se dentre as principais medidas em direção à sustentabilidade no ambiente construído. Visando alcançar este objetivo, os diversos aspectos a serem considerados em um prédio energeticamente eficiente são abordados neste trabalho, fazendo-se uma avaliação do consumo real da energia operacional e não só na fase de projeto. Desta forma, a avaliação é feita levando em consideração as condições climáticas e aproveitando os recursos disponíveis (sol, chuva, ventos, etc.) para diminuir os impactos no meio ambiente, tentando reduzir o consumo de energia e, conseqüentemente, os custos do usuário, tanto na fase de projeto quanto na edificação já construída. Com o uso de programas de simulação pretende-se prever com exatidão a demanda e o consumo da edificação, possibilitando introduzir as melhoras necessárias para otimizar seu comportamento térmico, aplicando Medidas de Conservação de Energia (MCE) sempre que possível, as quais apoiam os sistemas de condicionamento de ar, conseguindo a redução no dimensionamento e, conseqüentemente, economia de energia.

## Motivação e Desafios

O desenvolvimento humano está sempre relacionado com o consumo de energia elétrica, pela necessidade que dela tem o homem para realização das suas tarefas. O consumo energético anual do Planeta é resultado da soma dos consumos dos diferentes setores da sociedade, onde o setor de edificações está entre os maiores consumidores de energia elétrica, representando cerca de 40 % do total do consumo de eletricidade no mundo; estima-se que os sistemas HVAC (*Heating, Ventilation and Air Conditioning*– Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado), juntamente com o aquecimento de água, representam quase 60 % do consumo global de energia em edificações (OECD/IEA, 2013) (ATAM, 2017).

A empresa multinacional EXXONMOBIL publica relatórios anuais sobre energia e seus usos finais. Em relatório publicado em 2017 afirma que o crescimento da demanda global de energia será liderado pela crescente eletrificação da economia global, onde o 55 % do crescimento da demanda de energia no mundo ao longo do próximo século estará ligado à geração de energia. Uma consequência dessa tendência será um grande aumento na demanda por muitos tipos de energia usados para gerar eletricidade, principalmente fontes menos intensivas em carbono, tais como gás natural, energia nuclear, solar e eólica. Ainda segundo esse relatório, a energia utilizada para geração de eletricidade crescerá 50 % entre 2010 e 2040, impulsionado pela demanda de energia elétrica nos outros três setores considerados como os principais consumidores de energia (EXXONMOBIL, 2017).

- O transporte. Este setor converteu-se em uma das mudanças mais profundas no consumo de energia, demandando cerca de 40 % da energia do Planeta. Estudos demonstram que a proliferação de veículos híbridos e outros veículos avançados - junto às melhorias na eficiência de veículos convencionais - resultarão na estabilização da demanda de transportes particulares, mesmo que o número de veículos particulares no mundo venha a dobrar. Em contraste, a quantidade de caminhões, aviões, navios e trens deverá aumentar em 70 % a partir de 2010 até 2040, impulsionado pelo crescimento previsto da atividade econômica e pelo aumento associado à circulação de bens e mercadorias (EXXONMOBIL, 2017).

- A indústria. Fonte de atividade econômica e empregos, o setor industrial utiliza energia para produzir os materiais e produtos sendo atualmente considerado o setor responsável por cerca de 30 % do consumo de energia. De acordo com os dados apresentados por EXXONMOBIL (2017), a demanda por energia industrial no mundo, incluindo a eletricidade, irá crescer cerca de 30 % até 2040, visto que os países que não fazem parte da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) irão liderar o crescimento econômico global. Atualmente, a China, por exemplo, utiliza um quarto da energia industrial global, com a previsão de que para 2040 seu crescimento seja estabilizado, enquanto que na Índia, e em outros países da Ásia, da África e da América Latina o crescimento irá aumentar.

- As edificações/serviços. As residências e empresas representam uma parcela significativa da demanda por energia global, especialmente quando o uso da eletricidade é considerado, sendo responsáveis por 30 % do consumo. A demanda residencial/comercial por energia, incluindo a elétrica, estima-se que deverá aumentar em cerca de 25 % de 2010 a 2040 (EXXONMOBIL, 2017). Acredita-se que em 2040 a eletricidade irá fornecer 40 % da demanda mundial de energia residencial e comercial, devido à expansão econômica, à crescente prosperidade e ao aumento contínuo no número de residências que farão com que a demanda cresça em torno de 25 % no setor residencial/comercial. O consumo de energia neste setor continua mudando para energia elétrica e gás natural.

Na Europa, edificações comerciais e residenciais alcançam 38,7 % do total de energia consumida, e entre o consumo final total de energia estima-se que cerca de 26 % foram consumidos em edificações residenciais e 13 % em edificações não residenciais (BOYANO et al., 2013). Nos Estados Unidos da América (EUA), o setor residencial representa 22,2 % do consumo total de energia (consumo de energia primária e consumo de energia elétrica) em comparação com os 18,5 %, 31,4 % e 27,8 % do comercial, industrial e de transporte final, respectivamente (FUMO, 2014). Como o segundo maior consumidor de energia total após os EUA, a China também é o segundo maior consumidor mundial de energia elétrica em edificações; segundo DONG *et al.* (2017), o consumo de energia associado ao setor de construção civil da China inevitavelmente exibiu uma tendência ascendente junto com a industrialização e processo de urbanização, e aumentou gradualmente de 314 Mtep (em 1990) para 506 Mtep (em 2013). No entanto, a participação no total de energia consumida caiu de 35,7 % (em 1990) para 16,7 % (em 2013). Já no Brasil relata-se que

quase 50 % do consumo total de energia elétrica ocorre em edificações (LOPES et al., 2016).

Prevê-se que o consumo de energia no setor de edificações, juntando os setores comercial, público e residencial, deverá aumentar em 32 % entre 2015 e 2040. A maior parte do aumento ocorre em grandes países emergentes não membros da Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), onde a população continua a mudar de áreas rurais para urbanas (OECD/IEA, 2017).

Neste contexto e devido aos altos índices de consumo demonstrados, atualmente na maioria de países, as novas edificações são obrigadas a consumir o mínimo de energia possível. Estas mudanças, pode-se dizer, foram implementadas depois da crise petrolífera de 1973, que veio modificar a visão sobre o consumo dos recursos energéticos não renováveis. A noção de poupança energética das edificações começou a ser considerada como estratégia alternativa e, desta forma, a Eficiência Energética de Edificações (EEE) ganhou importância, passando a ser um dos principais objetivos das políticas energéticas em todo o mundo (PÉREZ LOMBARD et al., 2008). A Diretiva da União Europeia para o desempenho energético das edificações impõe, desde 2012, uma meta para consumo zero de energia para todas as novas edificações até o final de 2020 (EUR-LEX, 2012).

Em nível nacional, o Brasil dispõe de uma matriz energética de origem predominantemente renovável, com destaque para a geração hidráulica, que responde por 64,9 % da oferta interna. As fontes renováveis representam 79,3 % da oferta interna de eletricidade no Brasil, que é a resultante da soma dos montantes referentes à produção nacional mais as importações, que são essencialmente de origem renovável (EPE, 2017). No consumo final por setor, as edificações residenciais, comerciais e públicas consomem 14,6 % da energia produzida no Brasil. Se considerada apenas a energia elétrica, esse percentual sobe para cerca de 47,6 %. Destaca-se o crescimento do setor residencial em 6,2 %, e o industrial, com uma pequena alta de 0,2 %. Já os setores público, agropecuário, comercial e de transportes, quando analisados em bloco, apresentaram variação positiva referente ao ano de 2016 (EPE, 2017).

Esta perspectiva obriga países e profissionais a entender que o uso racional de energia em edificações precisa tornar-se rapidamente o foco de uma das questões-chaves a serem abordadas para enfrentar o desafio da mudança climática. Para entender as estratégias aplicadas no setor de edificações e como os países estão contornando o problema, é necessário entender e estudar normas, regulamentos e estratégias de construção de edificações.

## **Objetivos**

O objetivo principal deste trabalho é estudar e avaliar de forma comparativa, mediante o método de simulação computacional, técnicas de conservação de energia aplicadas a uma edificação construída na Região Amazônica Brasileira, considerada energeticamente eficiente e de

baixo consumo de energia. Destaca-se a importância desse estudo, por fazer uso de metodologias existentes que são aplicadas para conhecer os desempenhos térmico, energético e econômico de uma edificação em regiões de clima quente e úmido, assim como as condições de conforto oferecido aos usuários e, que por sua vez, são aplicáveis a qualquer tipo de edificação em condições climáticas similares, e que também podem ser estendidas para outras condições climáticas, feitas as devidas adaptações.

Como objetivos específicos têm-se:

- Fazer uma análise comparativa do desempenho térmico da edificação, mediante aplicação de MCE, para determinar a influência de parâmetros construtivos no comportamento térmico da envolvente em áreas de alta radiação solar;
- Analisar o consumo de energia elétrica para iluminação artificial e condicionamento de ar, e avaliar o impacto das MCE na redução das cargas térmicas e da energia necessária para atendimento do prédio, após a aplicação das medidas;
- Avaliar o impacto térmico e a contribuição energética de sistemas de geração de energia solar fotovoltaica adaptados e integrados à edificação;
- Determinar a viabilidade econômica das MCE instaladas e realizar uma análise dos custos evitados na edificação para cada estratégia;
- Estudar a replicabilidade do modelo da edificação em estudo com as MCE aplicadas, nas capitais dos estados da Amazônia Legal Brasileira.

### **Premissas e hipótese adotadas**

Este trabalho parte das seguintes premissas:

- a) Apesar das condições climáticas da região demandarem geralmente um alto consumo de energia elétrica para condicionamento de ar, existem alternativas técnica e economicamente viáveis para economizar energia e reduzir os custos de funcionamento;
- b) A aplicação de materiais e técnicas construtivas adequadas melhoram o desempenho térmico, lumínico e energético das edificações, garantindo o conforto dos usuários;
- c) Essas estratégias aplicadas a uma edificação real podem ser reproduzidas em regiões com características climáticas similares.

Tem-se por hipótese que o desempenho térmico, energético e, conseqüentemente, econômico de uma edificação em clima quente e úmido pode ser otimizado considerando medidas para o aproveitamento de iluminação natural, bem como de isolamento térmico e geração fotovoltaica de energia elétrica. A análise individual e conjunta dessas estratégias permite verificar a influência ou não das medidas estabelecidas.

## **Relevância do estudo**

A implementação de MCE e a avaliação criteriosa do impacto no desempenho térmico, energético e econômico de uma edificação construída na Região Amazônica mostra-se relevante, uma vez que existem poucos estudos que apontem as barreiras e/ou facilidades para oferecer conforto aos usuários com baixo consumo de energia. Nesse sentido faz-se necessário mostrar cada um dos benefícios obtidos nos diversos âmbitos de funcionamento de uma edificação.

Destaca-se, ademais, a necessidade de pesquisas sobre edificações de baixo consumo de energia, já que as pesquisas existentes para a Região não mostram análises detalhadas sobre o tema. No entanto, encontram-se pesquisas relevantes em relação à geração de energia fotovoltaica em edificações, porém sem considerar outros benefícios, como o aporte térmico dos sistemas à edificação. Os temas tratados neste estudo, com o respectivos resultados em economia energética e monetária, são:

- O aproveitamento da iluminação natural mediante estratégias que favorecem o conforto lumínico dos usuários e proporcionam economia de energia elétrica, sem provocar aumentos consideráveis de carga térmica para o interior dos ambientes iluminados naturalmente;
- O uso de isolantes térmicos em superfícies que recebem a maior quantidade de irradiação solar (cobertura e paredes leste e oeste) para diminuição do fluxo de calor para o interior, sem criar obstáculos para o resfriamento noturno natural da edificação;
- Os sistemas fotovoltaicos para geração de energia elétrica, adaptados e/ou integrados às edificações, oferecem benefícios térmicos que podem ser aproveitados para diminuir as cargas térmicas dos ambientes internos.

O estudo deste tema tem sua originalidade no fato de que os padrões construtivos atuais usados na Região frequentemente não levam em consideração as condições climáticas, sendo os sistemas artificiais responsáveis pela iluminação e pela retirada das altas cargas térmicas acumuladas no interior das edificações. Essa situação implica em um alto consumo de energia, comprometendo a eficiência energética da edificação e dos sistemas utilizados.

Assim, a pesquisa proposta apresenta relevância não apenas acadêmica, mas também técnica, prática e econômica, pois permite que medidas para redução do consumo de energia, comprovadamente eficientes, sejam aplicadas em edificações com climas similares, sem comprometer o conforto dos usuários e minimizando gastos no uso final de energia elétrica necessária para o desenvolvimento das atividades.

## **Metodologia**

Este item aborda o método geral da pesquisa; entretanto, cada um dos capítulos seguintes

apresenta um detalhamento do método aplicado ao propósito do estudo.

Para esta avaliação são levados em consideração dois tipos de avaliações: estática e dinâmica. A avaliação estática considera análises que não variam em função do tempo, e a avaliação dinâmica considera variações em função do tempo ao longo de um ano. Para a análise dinâmica são usados programas de simulação dos comportamentos térmico, energético e lumínico reconhecidos, e diversos modelos da edificação. Já para a análise estática é usado o regulamento vigente em nível nacional.

O método geral baseia-se em uma avaliação sistemática de um modelo de uma edificação projetada como de baixo consumo de energia e alto nível de eficiência para as condições climáticas da região onde ela se encontra inserida.

Como ponto de partida da pesquisa e para modelagem da edificação estudo de caso, são coletados os dados referentes à estrutura física da edificação, à potência instalada em iluminação, equipamentos, sistemas HVAC e à ocupação de cada espaço, servindo-se do projeto arquitetônico, da inspeção visual, tabelas, medições *in loco*, dados da potência dos equipamentos e dados dos fabricantes dos sistemas de condicionamento de ar. Posteriormente, são traçados perfis e rotinas de ocupação, de iluminação, uso de equipamento e do sistema de HVAC. Assim, definidos os parâmetros do modelo geométrico da edificação e as informações a ela associadas, estes são usados como parte integral dos dados de entrada para simulação térmica, de iluminação natural e energética.

Através do método de simulação computacional realizam-se simulações referentes a diferentes condições:

Um modelo base (M\_01). Apresentado como um modelo da edificação sem MCE específicas, onde é simulada e avaliada uma edificação com características geométricas e de uso similares ao modelo real, porém reproduzindo alguns padrões e materiais usados comumente na Região e na instituição universitária onde está inserida.

Um modelo real (M\_02). Ao modelo base são aplicadas MCE de maneira gradativa até alcançar o modelo projetado como eficiente, chamado M\_02. Entre as medidas estão sistemas fotovoltaicos e sua influência, a fim de alcançar um balanço positivo de consumo de energia elétrica.

O processo de análise para alcançar o modelo eficiente (M\_02) demanda uma série de análises e procedimentos, que podem ser resumidos da seguinte forma:

- a) Modelagem da edificação. Onde são reproduzidas, com a maior exatidão possível, as características atuais da edificação tais como: geometria, equipamentos, demanda de energia, consumo de energia, usos e ocupação. Neste modelo são substituídos alguns elementos arquitetônicos e omitidos os sistemas de geração de energia;

- b) Validação e calibração do modelo. A validação e a calibração do modelo são realizadas fazendo uso de dados medidos *in loco*, com a edificação em uso, e comparados com os resultados gerados pelos programas de simulações. Para estas medições foram usados diversos equipamentos tais como termo-higrômetros, luxímetros, medidores de energia, medidores de potência ativa, etc.;
- c) Simulação de diversos parâmetros e MCE aplicadas de forma gradativa ao M\_01, para determinar e avaliar os impactos térmico, energético e econômico das MCE aplicadas na construção, mediante comparações dos resultados gerados a cada passo e o modelo base;
- d) Finalmente, o M\_02 configura um modelo de edificação onde são fundamentadas as análises e definidos os comportamentos térmico e energético da edificação e seus sistemas. Este modelo gera os resultados necessários para determinar a viabilidade das propostas e a importância deste trabalho no contexto regional.

Considerando a necessidade de adaptação à legislação nacional vigente, são levados em consideração parâmetros de eficiência tanto na etapa de projeto quanto na edificação construída. Assim, o modelo M\_02 é avaliado pelo método prescritivo, para determinar o nível de eficiência energética alcançado, com o intuito de conhecer os índices de desempenho, em busca de garantias de menor consumo de energia e técnicas construtivas adequadas às normas vigente. Esta etapa é denominada análise estática, porque os resultados não variam em função do tempo.

Após as análises térmica e energética, são realizadas avaliações econômicas abrangendo desde o custo de obra civil até custos com energia elétrica em função das tarifas vigentes da concessionária local, para definir a viabilidade das MCE aplicadas. Posteriormente, inserindo este mesmo modelo nas condições e características particulares de cada cidade, o modelo M\_02 é simulado e analisado nas nove capitais dos estados da Amazônia Brasileira, a fim de se conhecerem as possibilidades de implementação das estratégias, ou parte delas, em cada cidade.

## **Desenvolvimento do Trabalho**

De forma geral, os itens a seguir descrevem o trabalho realizado.

- Capítulo 1 - Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica e conceitual sobre os principais temas abordados. Primeiramente aborda-se a legislação e os instrumentos de avaliação da EEE. Na segunda parte é abordada uma conceituação sobre edificações eficientes e estratégias de economia de energia. A última parte aborda o tema de comportamento térmico de edificações, estabelecendo-se os parâmetros para cada tipo de análise abordada. Nesta parte são descritos alguns programas usados para simulação dos desempenhos térmico e energético de edificações, com suas características, vantagens e desvantagens.

- Capítulo 2 - Neste capítulo é apresentada a edificação específica escolhida como estudo de caso. Para isso, são consideradas variáveis de grande importância, como localização, orientação,

geometria, clima e microclima. Com relação à edificação, são descritas as características, materiais, perfis de uso e sistemas, tanto para a análise estática quanto para a análise dinâmica propostas.

- Capítulo 3 - Aqui são feitas as simulações computacionais de diferentes modelos, destacando-se a importância da MCE aplicada para cada caso e, com os resultados obtidos nas simulações, são realizadas comparações entre as diferentes técnicas usadas. Na primeira parte é realizada a calibração do modelo, para garantir resultados mais confiáveis na simulação. Posteriormente, são realizadas análises para cada MCE aplicada na edificação, destacando as economias de energia elétrica obtidas com iluminação natural, o efeito dos materiais nas cargas térmicas, geração de energia a partir de fontes renováveis, e a contribuição para a economia no uso final de energia elétrica. Finalmente, o modelo consolidado é avaliado de acordo com os parâmetros estabelecidos pela regulamentação nacional, para conhecer o nível de eficiência alcançado.

- Capítulo 4 - Neste capítulo é realizada uma análise econômica do efeito da aplicação das medidas em relação ao consumo de energia. Inicialmente são inseridos, de forma sucinta, conceitos sobre indicadores econômicos usados e fatores que influenciam na economia monetária em energia elétrica. Na segunda parte, para cada MCE é realizada uma análise econômica em função de custos da obra civil e tarifas vigentes da concessionária local. Finalmente, o estudo de caso é simulado para as nove capitais dos estados pertencentes à Região Amazônica Brasileira, destacando-se as características peculiares de cada cidade, como o arquivo climático e a tarifa praticada pela concessionária local.

- Conclusões - Aqui é apresentada uma síntese das análises e resultados do trabalho, destacando-se os desdobramentos da pesquisa, as limitações do trabalho e algumas sugestões para trabalhos futuros.

# **1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. NORMAS, ESTRATÉGIAS E FERRAMENTAS**

O presente capítulo é de caráter descritivo e aborda os fatores e variáveis relacionados com os temas que norteiam este trabalho. Primeiramente é apresentada uma breve revisão sobre os instrumentos de avaliação de eficiência energética e das normas e regulamentação brasileiras vigentes. Em seguida são discutidos as edificações eficientes, edificações solares fotovoltaicos e estratégias usadas para elevar o nível de eficiência. Na terceira parte deste capítulo é apresentado um panorama sobre balanço térmico, fatores do comportamento térmico de edificações e ferramentas para simulação do desempenho termoenergético de edificações.

## **1.1 LEGISLAÇÃO SOBRE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES**

### **1.1.1 Instrumentos de Avaliação. Regulamentos e Normas sobre Edificações**

Na busca pela economia de energia em edificações existem duas abordagens principais: política e técnica. A abordagem política impõe a utilização de medidas específicas que são consideradas eficazes para reduzir o consumo de energia das edificações, e a abordagem técnica orienta os projetistas e profissionais a aplicar nos seus projetos técnicas mais eficientes e eficazes no uso da energia nas edificações.

Diversos mecanismos de abordagem política têm sido implementados em todo o mundo para melhorar a eficiência energética nas edificações. A OECD (2002) identifica os seguintes:

- Os mecanismos que controlam e regulam a EEE “são leis e regulamentos de implementação que requerem certos projetos de dispositivos, práticas ou sistemas para melhorar a eficiência energética” (OECD/IEA, 2013). Esses mecanismos são subdivididos em mecanismos de regulação normativa e informativa. Os regulamentos são um exemplo do tipo normativo, enquanto os mecanismos informativos oferecem ao usuário final informações que ele não é obrigado a considerar, tais como programas de etiquetagem.

- Os mecanismos que consideram os métodos econômicos baseados no mercado, que são elementos de ação ou participação voluntária.

- Mecanismos que empregam instrumentos de incentivo fiscal para a conservação de energia em edificações. Estes mecanismos são aplicáveis para diferentes setores e tecnologias.

- Mecanismos de apoio, informação e ação voluntária, que fornecem informações e apoio

para aumentar a sensibilização do público e aprimorar trabalho voluntário, visando encorajar mudanças do comportamento do consumidor, por meio de fornecimento de informações e de exemplos bem-sucedidos de implementação.

#### **1.1.1.1 Normas de eficiência energética**

Entende-se como os métodos de cálculo e de ensaios uniformes, desenvolvidos para definir o consumo e a eficiência energética de um aparelho, equipamento ou sistema consumidor de energia. Segundo CAVA *et al.* (2000), as primeiras normas de eficiência energética que afetaram dramaticamente os fabricantes e reduziram significativamente o consumo de energia foram estabelecidas na Califórnia, EUA na década de 1970 (1974 e entrou em vigor em 1977). Mais notoriamente desde os anos 1990, com a crescente conscientização no que tange às mudanças climáticas, os países desenvolvidos e cada vez mais os países em desenvolvimento têm promulgado normas para determinados produtos, abrangendo todos os usos finais e tipos de combustível, embora normalmente o foco seja em aplicações, em tecnologias de informação, iluminação, aquecimento e equipamentos de refrigeração, expandem-se para eletrodomésticos, códigos para edificações e políticas de etiquetagem. Existem vários fatores, dependentes de cada país, situação ou medidas escolhidas, que determinam a efetividade dessas medidas políticas em termos de alcance de seus objetivos. Isto é mostrado por DERINGER (2004) ao comprovar que os códigos de edificações reduziram o consumo de energia de novas moradias nos EUA em aproximadamente 30 %, mas, frequentemente, não são eficazes em países em desenvolvimento. Na Tailândia, padrões de eficiência energética de eletrodomésticos foram bem sucedidos para refrigeradores, mas não para condicionadores de ar. Descontos para produtos energeticamente eficientes têm sido eficazes na Dinamarca, mas ineficazes, em termos de custo-benefício, na Holanda.

A normalização permite comparar a eficiência entre equipamentos ou sistemas do mesmo tipo e, através da etiqueta, proporcionar ao consumidor informação imparcial. São um instrumento específico, dirigido a grupos objetivos, que são compostos por um grande número de usuários individuais, e a produtos homogêneos com amplos mercados. Embora as normas de eficiência energética sejam voluntárias, elas são o elemento básico e central dos instrumentos alternativos e complementares de definição de requisitos mínimos de eficiência, aplicados para a informação ao consumidor através da etiquetagem energética, proporcionando dados para uma escolha bem informada (selecionar o produto mais adequado e eficiente que esteja disponível). A regulação em forma de norma mínima obrigatória incentiva os fabricantes a melhorar o rendimento de energia nos seus aparelhos, a criação de convênios voluntários com fabricantes de equipamentos, e também distribuidores e comercializadores a terem produtos mais eficientes em estoque e exibição.

Com relação à EEE, os instrumentos podem ser divididos em dois segmentos: normas de desempenho global e normas descritivas.

As normas de desempenho global abordam a utilização da energia pela edificação como um

todo. Estas normas são baseadas na descrição do desempenho exigido do prédio, sem especificar de que forma alcançá-lo, e prescrevem um consumo anual de energia ou custo energético. Esta abordagem tem sido utilizada por um número de países desenvolvidos nos códigos de energia das suas edificações, e geralmente fornecem mais incentivos para as inovações, porém exigem uma melhor formação dos funcionários e dos inspetores da edificação (HUI, 2002). AWAWDEH; TWEED (2011) citando diversos autores, concluíram que os códigos baseados no desempenho global atendem a necessidade de uma abordagem mais flexível. Cita as principais vantagens de se utilizar essa abordagem, que oferece maior flexibilidade e incentiva soluções criativas e de inovação de novos materiais, também permite flexibilidade de projeto e pode considerar recursos inovadores; reduz os custos utilizados ao promover novas soluções criativas; e as soluções podem ser concentradas na qualidade em vez de preço. As normas prescritivas baseiam-se no fornecimento de uma descrição detalhada dos requisitos técnicos da edificação. Estas definem diferentes níveis de desempenho para o envelope da edificação e seus componentes ou sistemas prediais.

Sob estas duas categorias, segundo HITCHIN (2008) o Conselho Mundial de Energia identifica os seguintes tipos de códigos:

- a) componentes da envoltória;
- b) envoltória global;
- c) demanda limite de aquecimento e refrigeração; e
- d) desempenho energético.

Limitar as necessidades de aquecimento e resfriamento e desempenho energético são as duas abordagens preferidas nos últimos anos; ambas as abordagens são do tipo de desempenho global. Nesta abordagem os regulamentos especificam os requisitos mínimos para os diferentes componentes que as edificações têm que usar para atender o código, escolhidos com base na sua adequação ao clima e à capacidade de poupar energia. Os regulamentos podem ser diferentes nos componentes da edificação e no nível de rigor as suas necessidades.

Neste contexto, as normas prescritivas convertem-se em um dos instrumentos mais frequentemente utilizados, possivelmente por causa de seu fácil cumprimento, desempenhando um papel importante na melhoria da eficiência energética nas edificações (OECD, 2003).

### **1.1.1.2 Programa de etiquetagem**

Os programas de etiquetagem são utilizados em todo o mundo, incluindo numerosos países em desenvolvimento, entre eles China, Brasil e África do Sul (CLASP, 2007). Tais programas são considerados uma das mais eficazes e rentáveis medidas políticas, além de permitir que se atinja a tão desejada transformação de mercado, e a sua combinação com outros instrumentos políticos, como incentivos financeiros ou acordos voluntários, pode melhorar a sua eficácia. A etiquetagem

é também muitas vezes combinada com normas de eletrodomésticos.

De acordo com as características e as políticas internas de cada país, os programas de etiquetagem podem ser voluntários ou obrigatórios. O relatório da UNEP (MIRABEAU, 2009) ressalta que a etiquetagem voluntária pode ser considerada um instrumento informativo e, portanto, muitas vezes menos eficaz do que outros produtos da mesma categoria, uma vez que apenas os produtos mais eficientes podem ser etiquetados. Já os programas de certificação e etiquetagem obrigatórias, são definidos como a obrigatoriedade da prestação de informações aos consumidores finais sobre o desempenho energético de produtos como eletrodomésticos e equipamentos, e até mesmo edificações.

Enquanto os códigos de eficiência energética existem em quase todos os países desenvolvidos, os países em desenvolvimento estão introduzindo este tipo de legislação, frequentemente iniciando pela introdução de normas voluntárias. Os programas de etiquetagem voluntária apresentam resultados variados, dependendo das particularidades de cada país, geralmente dependendo das estruturas dos mercados, ou das estratégias de intervenção no mercado e de aplicação da leis.

A UNEP (MIRABEAU, 2009) identificou alguns problemas da etiquetagem voluntária, analisando países de America Latina onde também foram introduzidos os programas que posteriormente são transformados em programas de etiquetagem obrigatória após alguns anos. Os problemas citados são: o fraco compromisso do governo, mecanismos insuficientes de avaliação, falta de financiamento, e necessidade de estabelecer mais centros de avaliação para testar o desempenho dos eletrodomésticos antes da etiquetagem. Conclui que um grande problema de etiquetagem voluntária é que, em geral, os eletrodomésticos ineficientes não são etiquetados ou a etiqueta é retirada. Este problema poderá ser evitado somente pela etiquetagem obrigatória. Já países como Brasil e México, segundo LUTZ (1996), dispõem de programas de normatização energética mais avançados. Enquanto no Brasil existem convênios com a indústria sobre objetivos voluntários de eficiência energética, no México são aplicadas normas obrigatórias para eletrodomésticos, sistemas de iluminação e motores elétricos. Em ambos os países, a normatização energética faz parte das políticas e programas de uso eficiente da energia mais amplos.

Em geral identificam-se três classes de etiquetas de energia utilizadas no mundo:

- Etiquetas de aprovação;
- Etiquetas comparativas; e
- Etiquetas unicamente informativas.

As etiquetas de aprovação oferecem um “selo de aprovação” no qual especifica se o produto cumpre ou não certas normas específicas, e geralmente baseiam-se em um “sim-não”, oferecendo pouca informação adicional. As etiquetas comparativas permitem comparar a energia utilizada em todos os modelos disponíveis, para permitir uma melhor escolha, identificando duas categorias: a

que utiliza o sistema de classificação por categorias, e outra com uma escala gráfica de barras contínuas para mostrar o uso relativo de energia. As etiquetas meramente informativas proporcionam dados sobre o rendimento técnico do produto etiquetado, porém não oferecem um sistema simples (classificação, por exemplo) para comparar o rendimento energético com outros produtos. Elas contêm unicamente informação técnica e geralmente não são consideradas atraentes para o consumidor.

## **1.1.2 Ações**

### **1.1.2.1 Ações internacionais**

Recentemente, vários países e organizações têm adotado metas ambiciosas, com implicações de longo alcance sobre o uso de energia em edificações. Nos EUA, por exemplo, segundo NESLER; PALMER (2009), uma série de iniciativas de energia zero foram adotadas. A *Energy Commercial Building Initiative* (CBI), do Departamento de Energia, tem como objetivo conseguir edificações de energia zero comercializáveis em todas as zonas bioclimáticas para o ano de 2025. Igualmente, a Lei Federal de Independência e Segurança Energética do ano 2007 dos EUA estabelece que a CBI “desenvolva e distribua tecnologias, práticas e políticas para o desenvolvimento e implantação de edificações comerciais de energia zero no território nacional para qualquer edificação comercial recém-construída até o ano 2030; para 50 % do total de edificações comerciais para o ano 2040 e todas as edificações comerciais para o ano 2050” (NESLER; PALMER, 2009).

Em março de 2009, uma Comissão especial de energia zero criada pelo estado de Massachusetts (EUA) publicou um informe detalhando estratégias para a adoção universal de edificações de energia zero em novas construções para o ano de 2030. O Plano Estratégico de Eficiência Energética de longo prazo do estado da Califórnia (EUA), adotado em setembro de 2008, determina que , para o ano de 2020 todas as edificações residenciais novas sejam de energia zero, enquanto o prazo para as construções comerciais é o ano de 2030.

Ações análogas foram adotadas por vários outros países para reduzir substancialmente o consumo de energia em suas edificações. Na União Europeia, a reformulação da Diretiva 2002/91 do Parlamento Europeu e do Conselho de 2010 (UE, 2010) aponta para 31/12/2020 como a data limite a partir da qual todas as novas edificações deverão respeitar o conceito *Net Zero Building* (nZEB), e 31/12/2018 para os edificações públicos. Esta definição engloba edificações com um desempenho térmico correspondente às classes mais elevadas e em que a parcela de energia utilizada provém na sua maioria de fontes renováveis. A necessidade de isolamentos térmicos com maior desempenho e menor espessura tornou-se um problema que a comunidade científica tenta

solucionar há alguns anos. Em princípio, a meta referida é aplicável somente para as novas edificações, já para as edificações existentes não foram fixadas metas temporais, havendo somente a recomendação de cada país ter que ir reabilitando gradualmente o número de edificações existentes, transformando-os em nZEB. Tais sistemas integrados são endossados e apoiados por uma série de governos em uma forma de apoio direto para os custos de instalação de sistemas fotovoltaicos ou através do aumento da tarifa *feed-in*. A Lituânia, por exemplo, estabeleceu uma tarifa de 0,521 €/kWh para a construção de sistemas integrados, em comparação com 0,417 €/kWh para os sistemas não integrados em 2012.

### 1.1.2.2 Ações nacionais

No Brasil, nas últimas décadas tem-se visto um crescente interesse em incentivar a redução do consumo de energia elétrica, tendo sido há poucos anos aprovadas regulamentações e normas que tratam dessa questão. A normatividade para uso racional de energia nas edificações é elaborada pelo Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) por meio do programa PROCEL EDIFICA. Este programa foi instituído em 2003 pela ELETROBRAS/PROCEL e atua de forma conjunta com o Ministério de Minas e Energia (MME), o Ministério das Cidades (MCIDADES), as universidades, os centros de pesquisa e entidades das áreas governamental, tecnológica, econômica e de desenvolvimento, além do setor da construção civil. Conforme o programa, estima-se um potencial de redução de consumo de aproximadamente 30 % com implementação de ações de eficiência energética nos sistemas de iluminação e ar condicionado, e intervenções arquitetônicas na envoltória no que diz respeito às edificações existentes. Este percentual se eleva para 50 % em edificações novas.

As economias previstas pelo programa foram alcançadas. No entanto, desde 2005 observa-se um crescimento do consumo de energia elétrica nas edificações maior que o crescimento do PIB. Verifica-se que, em relação ao ano de 2007, o consumo de energia elétrica atual teve um incremento de 4 %, tendência que vem se constatando nos últimos anos. Por este motivo, foi lançado o Plano Nacional de Energia 2030 (PNE), que considera a Eficiência Energética como uma opção de investimento para atender a demanda de energia, ao definir uma meta de economia da ordem de 10 % do mercado previsto para 2030 (MME; EPE, 2007). O plano propõe a elaboração futura de um Plano Nacional de Eficiência Energética (PNEf). Os Planos Decenais de Energia (PDE) que se seguiram também inserem a eficiência energética no planejamento. O PNE nasceu com a proposta de “identificar os instrumentos de ação e de captação de recursos, de promoção do aperfeiçoamento do marco legal e regulatório afeto ao assunto, de forma a possibilitar um mercado sustentável de eficiência energética e mobilizar a sociedade brasileira no combate ao desperdício de energia, preservando recursos naturais” (MME; EPE, 2007). O plano considera os ganhos em eficiência energética como provenientes de duas parcelas: uma referente ao “progresso autônomo” e outra referente ao “progresso induzido”. O progresso autônomo é aquele que se dá de forma espontânea,

ou seja, através da reposição natural do parque de equipamentos por similares novos e mais eficientes. Por progresso induzido entende-se aquele que requer estímulos através de políticas públicas. No âmbito do PNE 2030, o ganho de eficiência energética através de progresso autônomo foi considerado nas projeções de demandas. No caso do setor elétrico, em 2030, além dos 5 % de redução da demanda considerados a partir do progresso autônomo, foi estabelecida uma meta de 5 % adicionais através do progresso induzido, a ser detalhada no PNEf. Neste último caso, a eficiência energética é tratada como uma opção de investimento para atender a demanda de energia. Para promover o progresso induzido, o PNEf deve identificar os instrumentos de ação e de captação dos recursos, de promoção do aperfeiçoamento do marco legal e regulatório afeto ao assunto, de forma a possibilitar um mercado sustentável de eficiência energética e mobilizar a sociedade brasileira no combate ao desperdício de energia, preservando recursos naturais.

A política de padronização de eficiência energética começou com implementação da Lei de Eficiência Energética - Lei 10.295 de 17 de outubro de 2001 (BRASIL, 2001a). A especificação de um padrão de mínima eficiência energética para diversos equipamentos, como refrigeradores, congeladores e condicionadores de ar, foi adotada somente seis anos depois da lei 10.295. Os critérios para especificar o primeiro regulamento para refrigeradores domésticos foram baseados na experiência do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE).

Após a publicação da Lei de Eficiência Energética, surgiu o Decreto 4.059 de 19 de dezembro de 2001 (BRASIL, 2001b), que a regulamenta e estabelece os pontos a serem abordados na regulamentação específica de cada produto (norma técnica de referência, mecanismos de avaliação da conformidade, níveis a serem atingidos, fiscalização, etc.). Fica ainda estabelecido que o Instituto Nacional de Metrologia (INMETRO) seja o órgão responsável pelos Programas de Fiscalização e Avaliação da Conformidade (BRASIL, 2001b). A partir deste Decreto, o INMETRO estabelece programas de etiquetagem, e passa a ter a responsabilidade de criar programas de avaliação da conformidade, compulsórios na área de desempenho energético, tendo, portanto, papel fundamental na implementação da Lei da Eficiência Energética.

### **1.1.3 Normas e Regulamentação Brasileiras**

No Brasil, a principal referência para a regulamentação e as normas utilizadas para avaliação do nível de eficiência energética, é a *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE).

#### **1.1.3.1 ASHRAE Standar 90.1**

Conhecida mundialmente como a norma base da eficiência mundial, é a primeira norma de EEE elaborada como parte do programa dos EUA de incentivo à eficiência energética.

Posteriormente foi revisada nos anos de 1980 e 1989, quando divulgou a norma de eficiência energética para edificações não-residenciais, a Standard 90.1 - *Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings* (ASHRAE, 1989) baseada no OTTV (*Overall Thermal Transmittance Value*), que é um índice de avaliação da transmissão de calor do ambiente externo para o interno através do envoltório da edificação. Segundo CARLO (2008), foram feitos alguns aprimoramentos em 1999, ano em que passou a utilizar um método prescritivo, um sistema de permutação (*trade off*) e o *Energy Cost Budget*, sendo revisada em 2004. Esta revisão, a ANSI/ASHRAE Standard 90.1 (HENNINGER; WITTE, 2004), propõe limites de propriedades térmicas de componentes construtivos e características da envoltória também para oito cidades brasileiras, sendo essas divididas em apenas 2 zonas: a zona 01, que compreende as cidades de Belém, Fortaleza, Recife, Salvador e Rio de Janeiro, e a zona 02, incluindo Brasília, Porto Alegre e São Paulo. Posteriormente foi publicada, no ano de 2007, a ANSI/ASHRAE Standard 90.1, para substituir a versão de 2004 e inclui adendos listados no Apêndice F da referida norma (ASHRAE, 2007). Entre os parâmetros estabelecidos estão: Transmissão térmica de paredes e telhado; relação janelas/parede (WWR); Fator solar do vidro; Densidade de potência e iluminação, e Sistema de ar condicionado.

#### **1.1.3.2 ABNT - NBR 15220**

Em 2005 a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) publicou a Norma Brasileira de Desempenho Térmico de Edificações, NBR 15.220, dividida em cinco partes:

Parte 1. Definições, símbolos e unidades;

Parte 2. Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações;

Parte 3. Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social;

Parte 4. Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida; e

Parte 5. Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo método fluximétrico.

A parte 3 da norma trata do zoneamento bioclimático e das diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Como metodologia para essa divisão, o território brasileiro foi dividido em 6.500 células, cada uma das quais foi caracterizada pela posição geográfica e pelas seguintes variáveis climáticas: médias mensais das temperaturas máximas; médias mensais das temperaturas mínimas; e médias mensais das umidades relativas do ar (ABNT, 2005). Esse levantamento estabeleceu oito zonas bioclimáticas em todo o território (Figura 1.1). A Zona 8, da qual a cidade de Belém (PA) faz parte, ocupa 53,7 % do território nacional, e nela enquadram-se cidades como Niterói e Natal, ainda que existam relevantes diferenças geográficas e ambientais entre as mesmas.

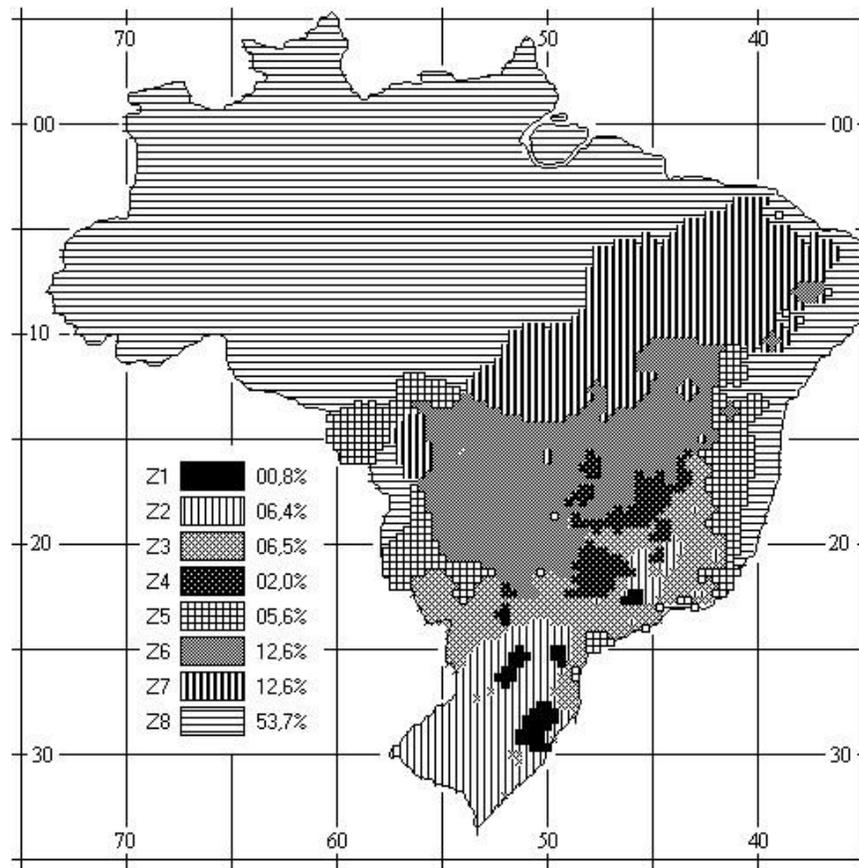


Figura 1.1. Zoneamento Bioclimático Brasileiro. Fonte: ABNT-15220.

### 1.1.3.3 ABNT - NBR 15575

Em 2013 foi publicada a norma NBR 15.575 - Edificações Habitacionais - Desempenho. Esta norma refere-se aos sistemas que compõem edificações habitacionais, independentemente dos seus materiais constituintes e do sistema construtivo utilizado. O foco está nas exigências dos usuários para a edificação habitacional e seus sistemas, quanto ao seu comportamento em uso, e não na prescrição de como os sistemas são construídos. Divida por sistemas é apresentada em seis partes:

- Parte 1. Requisitos gerais;
- Parte 2. Requisitos para os sistemas estruturais;
- Parte 3. Requisitos para os sistemas de pisos;
- Parte 4. Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas;
- Parte 5. Requisitos para os sistemas de coberturas;
- Parte 6. Requisitos para os sistemas hidrossanitários.

Esta norma é utilizada como um procedimento de avaliação do desempenho de sistemas construtivos e estabelece os requisitos e critérios de desempenho que se aplicam às edificações habitacionais como um todo integrado, ou a cada sistema avaliado de forma isolada. Não se aplica

a obras em andamento ou a edificações concluídas até a data da sua entrada em vigor. Também não se aplica a obras de reformas, de *retrofit* ou de edificações provisórias.

#### **1.1.3.4 Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. PROCEL**

O PROCEL é um programa do Governo Federal, coordenado pelo MME e sediado na Eletrobrás, que visa ao uso eficiente da energia elétrica, promovendo ações nos diversos setores do país. O leque de iniciativas do programa, realizado em conjunto com diversos parceiros, vai desde projetos direcionados ao uso final da energia a ações para divulgação do conhecimento e apoio à educação. Coordenado pelo INMETRO, visa prestar informações sobre o desempenho dos produtos no que diz respeito à sua eficiência energética através da ENCE. O PBE tem alta sinergia com o Selo PROCEL e os índices de eficiência definidos pelo CGIEE, representando um dos principais programas de eficiência energética do país.

#### **1.1.3.5 PBE - Programa Brasileiro de Etiquetagem**

O PBE é coordenado e regulamentado pelo INMETRO e classifica os equipamentos, veículos e edificações em faixas coloridas, em geral de “A” (mais eficiente) a “E” (menos eficiente). Tem por objetivo informar o consumo de energia e a eficiência energética de aparelhos ou sistemas, seguindo normas internacionais, onde a medição desse consumo e eficiência é feita pelo fabricante de forma contínua e segundo parâmetros e valores de ensaios de aferição e controle, conforme as disposições do regulamento específico para o uso da ENCE.

Para edificações, o processo de etiquetagem é criado para valorizar construções que utilizem o máximo de iluminação e de ventilação natural e eficiência em seus sistemas. A estimativa é de que a economia de eletricidade alcançada por esse tipo de arquitetura chegue a 30 % em edificações já existentes, por meio de modernização (*retrofit*), e a 50 % em prédios novos, que contemplem essas tecnologias. Para avaliar o nível EEE foram elaborados os seguintes regulamentos: Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (RTQ-C) regido pela Portaria 372 de 2010, do MDIC (MDIC, 2010), complementado pelas Portarias 18 de 2012 (MDIC, 2012a) e 50 de 2013 (MDIC, 2013a) atualmente em consulta pública para reformulação; e Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R), publicado em 2010, e regido pela Portaria nº 18 de 2012 (MDIC, 2012b). atualmente em revisão para ser encaminhada para consulta pública. A Figura 1.2 apresenta a ENCE para edificações comerciais, de serviço, e públicas.

Os RTQ são complementados pelo Requisitos de Avaliação da Conformidade para Eficiência Energética de Edificações (RAC), que estabelecem os critérios para o programa de avaliação da conformidade de eficiência energética de edificações, através do mecanismo da inspeção,

objetivando a concessão da ENCE, de acordo com os RTQ para cada objeto, e visando estimular a concepção de edificações mais eficientes (MDIC, 2013b).



Figura 1.2. Etiqueta Nacional de Conservação de Energia em Edificações. Fonte: RTQ-C.

### 1.1.3.6 Selo PROCEL

O Selo PROCEL de economia de energia foi instituído por Decreto Presidencial em 1993. É um produto desenvolvido pelo PROCEL, coordenado pelo MME, com sua Secretaria-Executiva mantida pela Eletrobrás. O Selo PROCEL tem por objetivo orientar o consumidor no ato da compra, indicando os produtos disponíveis no mercado que apresentam os melhores níveis de eficiência energética dentro da categoria A (maior eficiência energética). Como mecanismo importante para a consolidação de metodologia de ENCE, foi publicada a Instrução Normativa Nº 2 de 2014 do Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão (MP) e apresentada por CB3E *et al.* (2016), que dispõe sobre regras para a aquisição ou locação de máquinas e aparelhos consumidores de energia pela Administração Pública Federal direta, autárquica e fundacional, e uso da ENCE nos projetos e respectivas edificações públicas federais novas ou que recebam *retrofit*.

Outras metodologias internacionais, algumas com adaptação ao mercado brasileiro, são usadas para avaliação das construções. Assim, cada empreendedor interessado em uma certificação tem possibilidade de buscar aquela que melhor lhe servir. Porém, percebe-se ainda a falta de reflexões e adaptações às adequações desses selos à realidade nacional.

Dentre outros, destacam-se os seguintes, pela aplicabilidade no território nacional:

O *Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED). Baseado no apêndice G da 90.1 (ASHRAE/IES, 1989), o LEED é disseminado pelo *Green Building Council* e certifica edificações que minimizem seus impactos no meio ambiente, durante a construção e depois de finalizadas. O LEED é um sistema de certificação que foi visivelmente influenciado pelo BREEAM (Inglaterra), tendo estrutura e conceitos muito semelhantes, mesclando aspectos prescritivos e de desempenho e com versões para usos específicos de edificações.

AQUA (Alta Qualidade Ambiental). Nasceu de uma parceria entre a Fundação Vanzolini e o *Centre Scientifique et Technique du Bâtiment* (CSTB), Instituto Francês que é referência mundial na construção civil e sua subsidiária *Certivéa*, em cooperação com o Departamento de Engenharia de Produção e de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP). Destaca-se por levar em conta as especificidades do Brasil ao atestar processos sustentáveis no planejamento, na construção e na operação da edificação. O processo AQUA estabelece 14 categorias que podem ser reunidas em 4 grupos, as quais visam não só à criação de um espaço sadio e confortável, como também à minimização dos impactos provocados sobre o ambiente exterior.

## 1.2 Edificações Eficientes

*Nearly Zero Energy Buildings* (NZEB), *Net Zero Energy Building* (nZEB) e *Low Energy Buildings* (LEB) são edificações que se caracterizam pela pouca necessidade de energia externa para aquecimento e/ou arrefecimento, e têm como condição indispensável que seja energeticamente eficiente em todos os segmentos de consumo de energia. Outra condição indispensável é o aproveitamento de estratégias que contribuem para este fim, tais como: tratamento isotérmico do envelope; iluminação natural; exploração das potencialidades do clima (ventilação natural, por exemplo); calefação por energia solar quando necessária; sombreamento das fachadas; telhado verde; uso de energia através de fontes naturais permanentes ou intermitentes; coleta de água da chuva; reuso da água; armazenamento da produção de energia térmica, etc., adequando-as aos índices de exergia requeridos pelos respectivos processos de consumo.

*Zero Energy Buildings* são as edificações que, além de contemplarem a alta eficiência dos materiais e sua estrutura física, dos processos que usam energia elétrica e dos equipamentos que as integram; apresentam consumo baixo ou zero de energia, ou seja, a produção de energia nessas

edificações ou nas suas proximidades (sempre com fontes renováveis) iguala o seu consumo, e cujo equivalente no decorrer do ano gera um balanço positivo ou nulo, podendo exportar e importar energia. O conceito *Nearly Zero Energy Buildings (NZEB)*, introduzido pela *EPBD Recast (Energy Performance of Buildings Directive Recast)* (UE, 2010), são edificações com baixas necessidades energéticas compensadas pela contribuição de energia proveniente de fontes renováveis localmente ou nas proximidades e o *Net Zero Energy Building (nZEB)*, refere-se a edificações com um saldo nulo do consumo de energia. Diversas normas e regulamentações foram publicadas para definir alguns conceitos específicos sobre este tipo de edificações.

- A norma ASHRAE/ANSI/USGB 189.1 (ASHRAE, 2010) estabelece as diretrizes de conceito para o projeto de edificações de alto desempenho, também chamadas de *Green Buildings*. Igualmente, define novos requerimentos para *design*, construção e operação de edifícios comerciais de alto desempenho energético, com a visão de equilibrar a responsabilidade ambiental, recursos eficientes, conforto dos ocupantes e bem-estar. A norma é aplicada a edificações novas e edificações existentes e seus sistemas, apoiando o objetivo de desenvolvimento atual, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem as suas próprias necessidades.

- A EPBD estabelece as diretrizes para as edificações NZEB na Europa. Segundo essa Diretiva, um prédio NZEB é uma edificação com desempenho energético muito elevado, e as necessidades de energia quase nulas ou muito pequenas deverão ser cobertas em grande parte por energia proveniente de fontes renováveis produzidas no local ou nas proximidades (SANTOS, 2016). Os NZEB são uma imposição da Diretiva Europeia para os desempenhos energéticos das edificações, tornando-os obrigatórios para os novos até 2020, sendo que, para o sector público, a regra entra em vigor em 2018.

TORCELLINI *et al.* (2006) usam a definição geral para nZEB dada pelo Departamento de Programa de Tecnologias de Construção de Energia (DOE) dos EUA: um nZEB é um prédio residencial ou comercial com necessidades energéticas muito reduzidas através de ganhos de eficiência, de modo que o balanço das necessidades energéticas pode ser alimentado com tecnologias de energias renováveis.

Assim, as edificações NZEB e nZEB podem ser definidas como edificações que produzem a energia que consomem, podendo comprar ou não essa energia da rede pública ou ainda vender o excedente. Em primeira instância, isso é relativo ao balanço energético, onde a edificação deve possuir a menor demanda de energia possível, em função da eficientização de seus sistemas construtivos e tecnológicos. Nelas a demanda remanescente deve ser suprida através de energia gerada a partir de fontes renováveis instaladas no próprio local e que deve produzir uma quantidade de energia igual ou maior ao seu consumo anual, mesmo que em determinados períodos haja consumo da rede de distribuição, sendo compensado com excedentes em outras ocasiões. Ainda com a mesma perspectiva, devem ser levadas em consideração também as edificações com reduzido consumo de energia, onde, embora possa existir geração com fontes renováveis, as

mesmas não têm condições técnicas de gerar todo o excedente. Surge então o conceito de *Low Energy Buildings* (LEB), como edificações com estratégias de economia de energia representativas, como sistemas de produção de energia a partir de fontes permanentes, como solar térmica para calefação e água quente sanitária, solar fotovoltaica para iluminação e equipamentos, e/ou fontes térmica ou geotérmica para refrigeração. Estas edificações são classificadas como eficientes, porém ainda com consumos de energia superiores ao produzido ou a energia economizada.

Também deve ser abordada a questão das *Zero Emissions Building* (NZE), como edificações com balanço zero de emissões equivalentes de CO<sub>2</sub> procedentes do consumo de energia, que incluem não só as emissões de carbono geradas pela edificação em uso, mas também as geradas na construção da edificação e a energia incorporada da estrutura.

Desde estes pontos de vista, analisando os enfoques dados, conclui-se que uma edificação eficiente deve possuir a menor demanda de energia possível, em função da efficientização de seus sistemas construtivos e tecnológicos, e a demanda, ou parte dela, deve ser suprida através de fontes renováveis instaladas no próprio local.

### **1.2.1 Edificações Solares Fotovoltaicas**

Muitas das ações aplicadas às edificações nZEB ou LEB são consideradas insuficientes, devido ao balanço energético ser quase nulo ou então zero, gerando a necessidade de incentivar a concepção da criação de edificações com um balanço positivo, que produzam a partir de fontes renováveis sua energia consumida e sejam capazes de fornecer a energia requerida para a edificação e seus processos. Desta forma, a arquitetura contemporânea está mostrando um crescente interesse em incorporar nos seus projetos elementos como coberturas ou fachadas com sistemas fotovoltaicos ou com alguns dos diferentes tipos de materiais que compõem os módulos fotovoltaicos. Diante desta demanda, os sistemas fotovoltaicos integrados e/ou adaptados, surgem como um elemento que adiciona um inegável valor estético (quando integrado à edificação), podendo também contribuir em termos de isolamento térmico e acústico, além de produzir eletricidade. A energia gerada pelo sistema pode ser injetada diretamente na rede e comercializada aos grandes consumidores, ou pode ser usada para autoconsumo, como no caso dos sistemas isolados. Os sistemas fotovoltaicos em edificações devem ser considerados como parte integrante da estratégia ambiental global no projeto de construções energeticamente eficientes. Estes sistemas são um elemento chave na promoção desta nova abordagem para a construção civil e contribuem para os avanços no sentido de baixo teor de carbono, carbono neutro e edificações negativos de carbono.

RÜTHER (2004) ressalta a importância da geração de energia e o consumo ocorrerem

simultaneamente, fenômeno que faz com que a energia elétrica gerada em alguns períodos do dia tenha um valor maior para a concessionária elétrica do que em outros períodos em que a demanda não é crítica. De modo geral os prédios comerciais e interligados à rede pública convertem-se em uma aplicação ideal destes sistemas, pois os picos de consumo e geração são muitas vezes coincidentes, aliviando assim o sistema de distribuição da concessionária elétrica. Isto acarreta não somente uma economia de energia, mas também o aumento da vida útil de transformadores e outros componentes do sistema de distribuição. O mais óbvio exemplo disto é o caso da demanda de energia por aparelhos de ar-condicionado em períodos de elevada incidência solar e, portanto, também de geração de eletricidade. Desta forma, ainda que no sistema elétrico brasileiro o principal pico de consumo tenha início por volta do pôr do sol, como é o caso da concessionária local (18h30 às 21h29) (CELPA, 2018), vários alimentadores das concessionárias elétricas têm picos coincidentes com a máxima oferta solar, aumentando assim o valor da energia gerada nestes períodos.

CAAMAÑO (1998) ressalta os diversos aspectos que centram o interesse das edificações fotovoltaicas: energético, funcional e do meio ambiente. Do ponto de vista energético as edificações são descritas como a aplicação da energia solar fotovoltaica de maior eficiência, devido a que a energia é gerada no mesmo lugar de consumo, evitando perdas no transporte e distribuição, e com poucas perdas na transformação, já que os inversores operam tipicamente com elevados níveis de eficiência e em baixa tensão, podendo aproveitar-se na sua totalidade, devido à elevada fiabilidade da rede. Ressalta-se também o conceito de sincronicidade especificado pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) (US-DOE, 1996), em que geração e consumo ocorrem simultaneamente, ou seja, as horas de máximo consumo coincidem com as horas de máxima geração, tendência constatada cada vez mais em inúmeros países, e que supõe um benefício adicional em termos de nivelamento de carga da rede. Do ponto de vista funcional, o gerador fotovoltaico também é utilizado com diversos fins arquitetônicos: estético, inovador, proteção, envelope, etc. Do ponto de vista de meio ambiente, estas edificações supõem uma forma eficiente de reduzir as emissões de agentes contaminantes da atmosfera (CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>), principalmente aqueles derivados da geração de energia com combustíveis fósseis.

### 1.2.1.1 Histórico

Os sistemas solares fotovoltaicos em edificações aparecem na década de 1970, geralmente em áreas remotas sem acesso a uma rede de energia elétrica. Segundo CAAMAÑO (1998), nos EUA surgem com a elaboração por parte da administração federal, das primeiras recomendações relativas ao aproveitamento da energia solar fotovoltaica em edificações. Já na Europa, no final da década de 1980 começaram a ser construídos as primeiras edificações na Alemanha, Áustria e Suíça, que se caracterizaram inicialmente como projetos de demonstração tecnológica, mas que têm avançado incrementando o número de países participantes e também das tecnologias utilizadas.

Na década de 1990, começou-se a fabricação de produtos fotovoltaicos para a construção, especialmente concebidos para serem integrados ao envelope da edificação e tornaram-se comercialmente disponíveis (EIFFERT; KISS, 2000). Internacionalmente a situação tem evoluído no sentido de incrementar tanto o número de sistemas quanto de países envolvidos. As últimas décadas têm marcado o início de uma quantidade inumerável de tipos de tecnologias e elementos para aproveitamento de sistemas fotovoltaicos em projetos novos e em construções existentes, mostrando-se como uma estratégia eficaz para geração de energia em edificações residenciais, comerciais, industriais e institucionais.

Em nível nacional, o contexto técnico-político em que tais sistemas se inserem no Brasil ainda é tema em debate. Deu-se início com a Lei 8.631, de 4 de março de 1993 (BRASIL, 1993), que dispõe sobre os níveis tarifários e a extinção da remuneração garantida; a Lei 8.987, de 13 de fevereiro de 1995 (BRASIL, 1995a), que dispõe sobre o regime de concessão e permissão de serviço público, e a Lei 9.074, de 7 de julho de 1995 (BRASIL, 1995b), que estabelece normas para outorga e prorrogação de concessões e permissões. Também a Presidência da República, publicou o Decreto 2.003, de 10 de setembro de 1996 (BRASIL, 1996), que regulamenta a produção de energia elétrica de Produtores Independentes de Energia (PIEs) e Auto Produtores (APs); e o Decreto 2.655, de 2 de julho de 1998 (BRASIL, 1998), que regulamenta o Mercado Atacadista de Energia elétrica (MAE) e define regras de organização do Operador Nacional do Sistema elétrico (ONS). No ano de 1999, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) publicou a Resolução N° 112, de 18 de maio de 1999 (ANEEL, 1999), que estabelece os requisitos necessários para a obtenção de registro ou autorização para a implantação, ampliação ou repotencialização de centrais geradoras de energia a partir de fontes renováveis, incluindo as centrais fotovoltaicas. Assim, as instalações solares fotovoltaicas integradas a edificações urbanas e interligadas à rede elétrica pública se caracterizam como APs, podendo também caracterizar-se como PIEs (RÜTHER, 2004).

A legislação que rege a produção, transmissão e distribuição de energia elétrica no Brasil prevê então, os sistemas solares fotovoltaicos integrados a edificações urbanas e interligados à rede elétrica convencional. Neste contexto, destaca-se a Resolução Normativa da ANEEL N° 482, de 17 de abril de 2012 (ANEEL, 2012), que regulamenta a micro e minigeração de energia por parte dos consumidores, sendo que a energia não utilizada pode ser exportada para a rede elétrica e, assim, reduzir a fatura de energia elétrica, e atualizada pela Resolução Normativa da ANEEL N° 687, de 24 de novembro de 2015 (ANEEL, 2015).

Contudo, ainda é necessária a criação de políticas de incentivo para o desenvolvimento de uma indústria nacional para equipamentos e insumos.

### **1.2.1.2 Edificações Fotovoltaicas Conectadas à Rede (*On-Grid*)**

Como nem todas as edificações podem gerar e abrigar dispositivos de armazenamento de

energia para atender sua própria demanda, surgem as Edificações Fotovoltaicas Conectados à Rede (EFCCR), constituindo-se na aplicação da energia solar que tem experimentado a maior expansão nos últimos anos, e em um número cada vez maior de países. O EFCCR chama-se assim pelo fato de dispor de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica convencional e que é integrado ou adaptado arquitetonicamente à própria edificação. A diferença para os sistemas autônomos é dada pelo fato destes não usarem baterias, uma vez que a eletricidade gerada é transmitida à rede elétrica convencional, sem acumulação prévia. Porém, é necessária a instalação de um inversor que transforme em alternada a corrente contínua dos módulos, além de um medidor bidirecional, como mostra a Figura 1.3. Deste modo, são combinadas as características do gerador e do consumidor de energia, com o conseqüente intercâmbio energético entre a edificação e a rede elétrica, quer dizer, operam em paralelo com a rede. e então, se o fornecimento do sistema fotovoltaico for menor do que a demanda, a rede fornece o equilíbrio e, quando há excesso de energia do sistema fotovoltaico, esta é injetada na rede.

Esta é a configuração mais comum e favorece que, quando a edificação injeta na rede, acumula um crédito energético. Neste tipo de sistema, pelas características de geração “in loco”, as perdas por transmissão e distribuição, comuns ao sistema tradicional de geração centralizada são evitadas. Outra vantagem é o fato de representarem usinas descentralizadas que não ocupam área extra, pois fazem parte da edificação. As principais diferenças entre as centrais e a edificação são apresentadas na Tabela 1.1, e são fundamentalmente a integração à edificação, simplificando a instalação, e a proximidade com o lugar de consumo, fazendo com que as razões que motivam a aquisição e os fatores que regulam sua atividade econômica sejam diferentes.

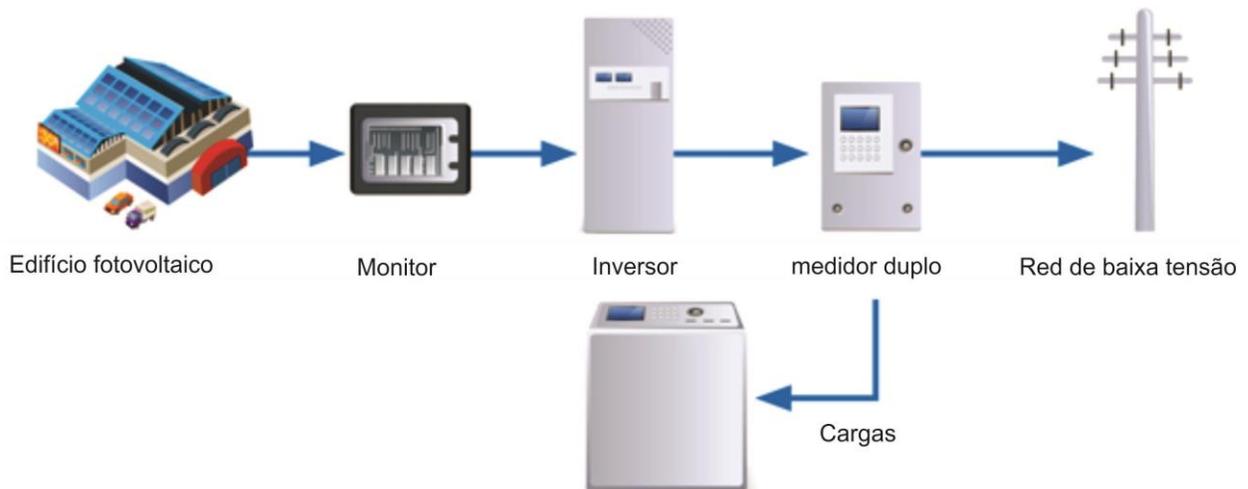


Figura 1.3. Configuração de um sistema conectado à rede.

Tabela 1.1. Diferenças entre centrais fotovoltaicas e EFCR.

	<b>Central Fotovoltaica</b>	<b>Edificação Fotovoltaica</b>
Geração	Centralizada	Descentralizada
Localização	Adquirir e usar o terreno	Existente (edificação)
Instalação	Obra civil adicional	Infraestrutura simples
Conexão à rede	Precisa ser realizada	Existente (edificação)

### 1.2.1.3 Classificação dos sistemas fotovoltaicos em edificações

Duas classificações principais podem ser definidas para a montagem de estruturas fotovoltaicas em edificações: *Building-Applied Photovoltaics* (BAPV), como sistema adaptado à edificação, e *Building-Integrated Photovoltaics* – BIPV, como sistema integrado à edificação. A Figura 1.4 apresenta esquemas das formas de integração de módulos nos dois tipos de sistemas.

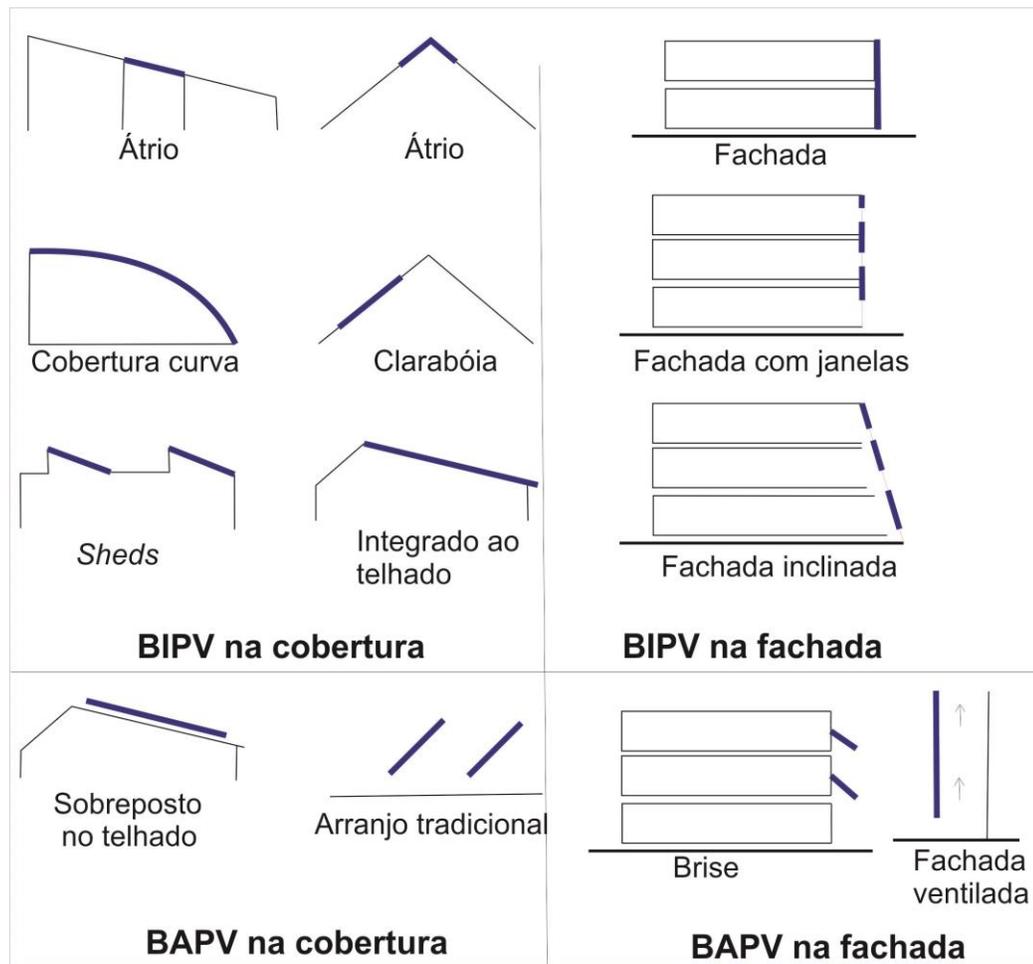


Figura 1.4. Formas de integração a adaptação à arquitetura.

### ***Building-Integrated Photovoltaics - BIPV***

Os sistemas fotovoltaicos integrados à edificação referem-se ao sistema de geração de energia solar fotovoltaica concebido, construído, instalado e integrado perfeitamente à edificação. Estes sistemas, literalmente, formam parte da estrutura de uma edificação e são considerados uma parte funcional do mesmo e arquitetonicamente incluídos, desde a etapa do projeto ao funcionamento da edificação como um todo. Esta categoria inclui os sistemas que substituem os materiais de construção convencionais, tais como, telhas, vidros para fachadas, entre outros. Estes tipos de produtos podem ser indistinguíveis das partes não fotovoltaicas, esteticamente, e podem ser atraentes quando há um desejo de manter a continuidade de arquitetura e não para atrair a atenção para o sistema de geração. Estes tipos de arranjos incluem tamanhos de módulos feitos sob medida e formas com espaços opacos ou transparentes entre as células e podem ser usados para paredes de cortina, toldos, janelas e/ou claraboias. Em claraboias, por exemplo, o sistema fotovoltaico é parte integrante da envolvente da edificação, pode ser usada como unidade de geração autônoma para a edificação e que regula a quantidade de luz que entra através de protetores solares automáticos, alimenta iluminação de emergência e é um elemento de iluminação natural.

Uma das apresentações mais interessantes dos componentes dos sistemas BIPV são os módulos do tipo vidro-vidro. Eles não têm a moldura de alumínio e algumas outras peças, que são típicos de módulos padrão; em vez disso, as células do módulo são cobertas apenas com EVA, formando um elemento com duas folhas de vidro temperado, com diversas possibilidades para se adequar às diversas soluções arquitetônicas. Algumas características podem variar, como a distância e a disposição das células, as diferentes variações do tamanho do módulo, a cor das células e da vedação posterior, a transparência do módulo, etc.

Algumas das vantagens dos sistemas fotovoltaicos integrados à edificação são:

- Geração de energia. A energia é gerada no local e substitui ou complementa a energia que seria adquirida da concessionária local;
- Função de componentes de construção e materiais, ou seja, substituem elementos de construção em vez de serem aplicados sobre outros elementos;
- Pode substituir o material de vedação, convertendo-se em coberturas, fachadas, brises e pérgolas;
- Realça a beleza da edificação e faz a construção de uma unidade perfeita. Os módulos do tipo vidro-vidro, por exemplo, são personalizáveis e é o projetista quem decide o tamanho, função, cores, etc.;
- São instalados com as mesmas características da edificação (orientação e inclinação);
- Pelas suas propriedades multifuncionais, os sistemas BIPV permitem diminuir o custo da edificação, podendo o custo do sistema fotovoltaico (em parede ou teto) ser compensados com o custo do elemento de construção que substitui.

Deve ser levado em consideração que muitas das variações afetam o rendimento elétrico dos módulos. Segundo CHIVELET; SOLLA (2010) uma maior transparência implica uma menor quantidade de células e uma disposição alterada, geralmente com fins estéticos, resultando como consequência na redução da potência elétrica em proporção direta à redução de número de células. Por outro lado, a transparência pode modificar o comportamento energético da edificação, tanto por permitir a passagem de luz natural para seu interior, como por afetar o fator solar, afetando também o coeficiente de transmissão térmica do módulo. A Figura 1.5 mostra um exemplo de BIVP com módulos transparentes na cobertura e um exemplo de módulos integrados à fachada de uma edificação (SOLARNOVA, 2017).



Sede do Automóvel Clube Alemão (ADAC)  
Hannover, Alemanha

Estádio EWE  
Oldenburg, Alemanha

Figura 1.5. Tipos de instalações BIPV em edificações. Fonte: SOLARNOVA (2017).

### *Building-Applied Photovoltaics - BAPV*

São sistemas considerados “adicionais” à edificação, não diretamente relacionados com aspectos funcionais da estrutura. Esses sistemas possuem uma estrutura adicional que suporta módulos emoldurados convencionais e podem ser classificados em duas subcategorias: sistemas que acompanham a edificação, geralmente instalados por cima da superfície do telhado e paralelos à inclinação de um telhado inclinado, e arranjos montados em *rack*, que são normalmente instalados em telhados planos, de modo que os módulos estão em uma ótima orientação e inclinação para a aplicação. A estrutura é tipicamente ligada ao telhado por meio de uma série de suportes que são fixados mecanicamente a um segmento do sistema de estrutura de telhado (Figura 1.6). O objetivo da BAPV é simplesmente para gerar eletricidade, sem entrar em conflito com a função da edificação em si, e não enfraquece ou valoriza a função da edificação original.

As principais características dos sistemas BAPV são:

- Os módulos fotovoltaicos são instalados sobre a edificação e podem ter características diferentes das da edificação (orientação e inclinação);
- Facilita a possibilidade de *retrofit*;

- Não substitui o material de vedação e, portanto, permite mudanças sem alterações arquitetônicas;
- Permite cobrir grandes espaços de coberturas.



Figura 1.6. Tipos de instalação BAPV em edificações. Fonte: SOLARNOVA (2017).

Os sistemas fotovoltaicos, sejam integrados ou adaptados às edificações, contribuem de maneira significativa para a economia e a estética, quando o sistema é projetado na edificação durante as fases preliminares de concepção. Assim, estes devem corresponder às dimensões, propriedades estruturais, qualidades, expectativa de vida, padrão construtivo, materiais do revestimento, cobertura, etc., mantendo a função do elemento de construção e adicionando a possibilidade de produzir energia renovável.

#### 1.2.1.4 Legislação nacional

A partir da Audiência Pública 042/2011 (ANEEL, 2011) foram construídas as bases para a Resolução Normativa N° 482 de 2012 (ANEEL, 2012), revisada pela Resolução Normativa da ANEEL n° 687 de 2015 (ANEEL, 2015) e atualmente em consulta pública visando ao aprimoramento das regras aplicáveis à micro e minigeração distribuída (ANEEL, 2018).

Esta Resolução Normativa estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia elétrica. A norma cria o sistema de compensação de energia, que permite ao consumidor instalar pequenos geradores em sua unidade consumidora e trocar energia com a distribuidora local. Conforme disposto nessa resolução, a micro e a minigeração distribuída consistem na produção de energia elétrica a partir de pequenas centrais geradoras que utilizam fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conectadas à rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras. A resolução estabelece o tipo e a potência máxima dos geradores, que podem ser hidráulicos (micro hidrelétricas), eólicos (micro aerogeradores) e solares (fotovoltaicos).

Assim, a microgeração distribuída é a central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW; e a minigeração distribuída é a central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW para fontes hídricas ou menor ou igual a 5 MW para cogeração qualificada, ou para as demais fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;

A tecnologia que mais se aplica à micro e mini-geração distribuída é a energia solar fotovoltaica, que aliada à existência de áreas de telhado disponíveis, proporciona um grande crescimento deste mercado no país, principalmente nas grandes cidades.

No caso específico de geração de energia com sistemas fotovoltaicos, a energia gerada pelo sistema é injetada na rede criando créditos que podem ser resgatados quando houver pouca ou nenhuma radiação solar. Segundo a ANEEL (2015), este armazenamento pode ser resgatado no prazo de 60 (sessenta) meses, pois a energia não pode ser vendida para a distribuidora de eletricidade. Ainda assim, devido à alta disponibilidade solar, algumas localidades se beneficiarão financeiramente de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR), por conta das tarifas de energia elétrica praticadas pelas distribuidoras locais. Para adoção do sistema de compensação de energia as UC deverão instalar medidores eletrônicos. No caso da microgeração distribuída deverá ser instalado medidor bidirecional que deve, no mínimo, diferenciar a energia elétrica ativa consumida da energia elétrica ativa injetada na rede, e no caso da minigeração distribuída deverá ser instalado um medidor de 4 quadrantes que possibilita o faturamento de excedente de reativos. Hoje já é feito o faturamento de excedente de reativos para grandes consumidores, e com a utilização de sistemas fotovoltaicos para reduzir o consumo de energia ativa, haverá uma redução no fator de potência (FP), a qual será interpretada como um excedente de reativos levando a uma cobrança desse “excedente”.

Em síntese, a ordem de compensação dos créditos é resumida pela ANEEL em:

- O excedente de energia que não tenha sido compensado na própria unidade consumidora pode ser utilizado para compensar o consumo de outras unidades consumidoras, observando o enquadramento como empreendimento com múltiplas unidades consumidoras, geração compartilhada;

- O titular da unidade consumidora onde se encontra instalada a microgeração ou minigeração distribuída deve definir o percentual da energia excedente que será destinado a cada unidade consumidora participante do sistema de compensação de energia elétrica, podendo solicitar a alteração junto à distribuidora, desde que efetuada por escrito, com antecedência mínima de 60 (sessenta) dias de sua aplicação;

- Em cada unidade consumidora participante do sistema de compensação de energia elétrica,

a compensação deve se dar primeiramente no posto tarifário em que ocorreu a geração e, posteriormente, nos demais postos tarifários;

- Os créditos de energia ativa expiram em 60 (sessenta) meses após a data do faturamento e serão revertidos em prol da modicidade tarifária sem que o consumidor faça jus a qualquer forma de compensação após esse prazo.

### **1.3 COMPORTAMENTO TÉRMICO DAS EDIFICAÇÕES**

Para analisar ou prever o comportamento térmico das edificações é necessário compreender os princípios de transferência de calor, assim como a existência de outros fenômenos envolvidos, que envolvem o indivíduo, suas reações físicas e os processos de transferência de calor em materiais e elementos físicos da edificação. Isto é, a quantidade de energia necessária para atingir um estado estacionário de conforto térmico só pode ser avaliada contabilizando-se as trocas de calor e a reação dinâmica da edificação às mesmas. O efeito da radiação solar, por exemplo, combinado com a temperatura exterior, não é imediato, ocorrendo com um determinado desfasamento temporal. Este efeito caracteriza-se por um estado inicial, um estado transiente e um estado final (de equilíbrio estacionário), sendo que a evolução da temperatura no interior da edificação depende da capacidade de armazenamento de calor do mesmo.

Neste contexto, torna-se importante entender quais são os elementos chaves no processo energético de uma edificação, conhecer a natureza das cargas térmicas e a interação com o ambiente construído. A utilização de materiais construtivos adequados ao clima local, a aplicação de conceitos de eficiência energética para controle da radiação solar e da transferência de calor para o interior da edificação são alguns dos principais parâmetros a serem considerados.

#### **1.3.1 Cargas Térmicas**

As cargas térmicas equivalem a cargas de resfriamento e de aquecimento necessárias em uma edificação, e da correta análise das mesmas depende em grande parte um bom projeto dos sistemas de refrigeração e de aquecimento. Um bom cálculo de cargas térmicas e dos respectivos sistemas representa influência positiva nos custos iniciais da construção, no conforto e na produtividade dos ocupantes da edificação, assim como nos custos de operação e de consumo de energia, convertendo-se na base principal para projetar os HVAC. Para o presente trabalho, foca-se unicamente na carga de resfriamento, devido às características climáticas da Região Amazônica, onde não há necessidade de aquecimento do ar e os sistemas de condicionamento são utilizados exclusivamente para arrefecimento.

**Carga de resfriamento.** É a fração de energia que é necessário eliminar para manter o ambiente interior em condições de umidade e temperatura desejadas. Estes sistemas são projetados e classificados segundo o tamanho, e controlados para alcançar uma adequada transferência de energia. A quantidade de energia a ser retirada varia continuamente, dependendo de fatores externos (temperatura exterior) e internos (ocupação, equipamentos, iluminação). O cálculo da carga para resfriamento, resulta dos processos executados através do envelope da edificação, de fontes internas e dos componentes do sistema. Entre as componentes que afetam o comportamento de uma edificação estão: Externas - paredes, cobertura, aberturas, divisórias, forros e pisos; Internas - iluminação artificial, ocupação, aparelhos e equipamentos elétricos, infiltrações, saídas de ar, ventilação e umidade.

**Carga de resfriamento instantânea.** É a taxa ou fração na qual a energia calorífica é dada por convecção no ar da zona em um ponto específico. Devido à quantidade de elementos que intervêm no intercâmbio de calor por radiação (superfícies, móveis, divisórias, outras massas, etc.) o processo resulta mais complexo, pois a maioria das fontes de ganho de calor transferem energia por convecção e radiação. A radiação é absorvida pelas massas térmicas na zona e posteriormente transferidas por convecção dentro do espaço. A parte correspondente à convecção, no entanto, imediatamente se transforma em carga térmica.

### 1.3.1.1 Processos de transferência de calor

Como explicado previamente, o desempenho térmico de uma edificação depende significativamente da sua envoltória e de fatores relacionados com o clima, além dos ganhos internos (ocupação, iluminação e equipamentos). Portanto, sempre devem ser consideradas as características intrínsecas da edificação, da envolvente exterior e a interação entre estas. Como em qualquer outro sistema, os ganhos térmicos em edificações podem ser ou não desejáveis, dependendo da época do ano e das condições exteriores. Portanto, o balanço de energia térmica deve ser calculado para o ano inteiro (ano típico), a fim de incluir todas as condições climáticas sazonais.

O balanço térmico de edificações considera um conjunto de fatores que são mostrados na Figura 1.7, a saber:

Ganhos internos ( $Q_i$ ) - energia gerada no interior da edificação pela atividade humana, equipamentos e iluminação artificial;

Trocas de calor devido às renovações de ar ( $Q_v$ ) - sistemas de ventilação e infiltrações;

Ganhos solares ( $Q_s$ ) - aquecimento do ar interior e da massa térmica da edificação pela radiação solar;

Trocas de calor por condução através da envolvente ( $Q_T$ ) - perdas ou ganhos térmicos pelas paredes, cobertura, envidraçados, solo ou pontes térmicas.

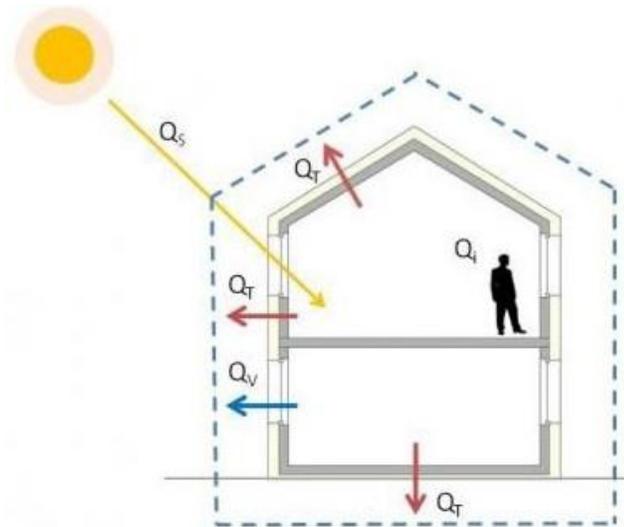


Figura 1.7. Fatores considerados em trocas térmicas de calor.

Quando as edificação apresentam espaços com temperaturas diferentes, conhecidos como zonas térmicas, ocorre uma troca de calor entre os ambientes, podendo cada um ter diferentes exigências térmicas. A equação geral do balanço térmico de edificações em regime estacionário encontra-se representada na Equação 1.1.

$$Q_i + Q_s \pm Q_t \pm Q_v = 0 \quad (1.1)$$

Dependendo das condições exteriores e interiores, as trocas de calor por condução e devido a ventilação e infiltrações do espaço podem assumir valores positivos ou negativos. Os mecanismos de transmissão de calor representados na Figura 1.8 determinam o balanço térmico que influencia a variação da temperatura no interior das edificações.

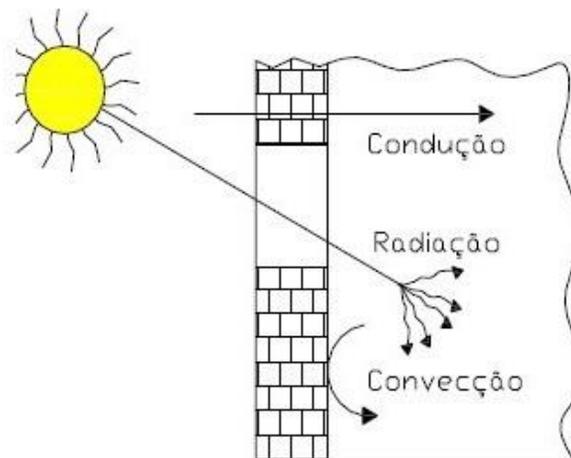


Figura 1.8. Mecanismos de transmissão de calor em edificações.

**Condução.** É o processo de transferência de energia através de um meio material, sem transporte de matéria. A energia térmica se propaga de partícula para partícula por meio de um material sólido em contato, ou mesmo partes do corpo que estejam em temperaturas diferentes. No âmbito da térmica de edificações é a responsável pelo fluxo de calor entre as superfícies exterior e interior de uma determinada solução construtiva. Para efeitos de cálculo, este fluxo é comumente considerado unidimensional e obtém-se através da equação da Lei de Fourier (Equação 1.2).

$$q_x = \kappa A \frac{dT}{dx} \quad (1.2)$$

onde  $A$  é a área ( $m^2$ ) perpendicular ao fluxo de calor,  $T$  a temperatura, e  $\kappa$  a condutividade térmica do material ( $W/(mK)$ ) e  $dT/dx$  é a variação espacial da temperatura.

A condutividade térmica é uma propriedade de um material, independentemente de sua espessura ou tamanho. Esta propriedade é definida como sendo o fluxo de calor que atravessa a unidade de superfície de um determinado material com uma determinada espessura ( $e$ ), por cada grau de diferença de temperatura entre as suas faces. Em todos os casos é importante levar em consideração as pontes térmicas, em caso de descontinuidade de elementos construtivos.

**Convecção.** É o mecanismo de transferência de calor originado pelo movimento de um fluido, sendo este líquido ou gasoso (entre um meio e um fluido em movimento).

Pode ser convecção natural ou convecção forçada. A convecção natural ocorre quando um sistema torna-se instável e conseqüentemente inicia-se um processo de mistura pelo movimento de massa. Isso se dá devido à diferença de temperatura e densidade, mas o movimento do fluido não é forçado externamente por bombas, ventiladores mecânicos ou vento, isto é, as situações de convecção natural são originadas por duas forças. o peso próprio do fluido (campo gravitacional) e as forças devidas ao gradiente de densidade de massa no fluido relacionado com sua variação de temperatura.

A convecção forçada se dá quando é provocada por um escoamento em que o movimento entre o fluido e a superfície se mantém mediante agentes externos (ventilador, bomba ou vento) e não pelas forças de empuxo provocadas por gradientes de temperatura no fluido. Esta pode ser a forma mais eficiente de transferir calor por convecção, possuindo um coeficiente de transferência de calor de convecção ( $h_{conv}$ ) superior ao coeficiente da convecção natural.

Sabendo a importância que a convecção tem para renovar ou fornecer calor de uma superfície sólida de uma forma mais eficiente, recorre-se à equação de resfriamento de Newton (Equação 1.3) para calcular o fluxo entre uma superfície lisa e o meio ambiente.

$$q = A \cdot h_c \cdot \Delta T \quad (1.3)$$

onde  $q$  é o calor transferido por convecção ( $W$ ),  $h_c$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção ( $W/(m^2 K)$ ),  $A$  é a área de superfície ( $m^2$ ), e  $\Delta T$  é a diferença de temperatura entre a superfície e o ambiente ( $^{\circ}C$ ).

O coeficiente de convecção ( $h_c$ ) depende das propriedades do fluido (densidade, viscosidade, condutividade térmica e calor específico), da natureza do escoamento, da posição da superfície, da direção do fluxo de calor e da velocidade do fluido. Por exemplo:

- para superfícies verticais (fluxo de calor horizontal).  $h_c = 3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ;
- para superfícies horizontais
  - de fluxo ascendente  $4,3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
  - de de fluxo descendente  $1,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .

Segundo SZOKOLAY (2004) estes valores são válidos quando o fluxo de ar é devido apenas à transferência de calor (considerando-se condições normais de ar calmo). Se a superfície está exposta ao vento, ou o ar é movimentado mecanicamente (ou seja, convecção forçada), o coeficiente de convecção é muito maior.

$$h_c = 5,8 + 4,1 v \quad (1.4)$$

onde  $v$  é a velocidade do ar em m/s.

**Radiação.** Da mesma forma que a convecção, a radiação é um fenômeno superficial, mas diferentemente dos processos anteriores, não necessita de um sólido ou fluido de transporte, propagando-se através de ondas eletromagnéticas, podendo ocorrer também no vácuo. Todo material que possua uma temperatura superficial positiva e maior que zero (na escala Kelvin) estará emitindo radiação de acordo com a temperatura da superfície.

No caso da envolvente de edificações é de interesse estudar a radiação solar incidente nas fachadas e a troca líquida de radiação entre a envolvente e sua vizinhança devida à diferença de temperatura entre elas.

A radiação é representada pelos seguintes valores adimensionais:

*Refletância* ( $\rho$ ) é a razão entre o fluxo de radiação eletromagnética incidente em uma superfície e o fluxo que é refletido.

*Absortância* ( $\alpha$ ) é o quociente entre a radiação solar absorvida por uma superfície e a radiação solar incidente sobre esta mesma superfície.

*Emissividade* ( $\varepsilon$ ) é a razão entre a radiação emitida pela superfície e a radiação emitida por um corpo negro na mesma temperatura, considerando-se que a emissividade do corpo negro é perfeita.

O cálculo da troca de calor por radiação é complicado, mas é muito simples para o efeito que é o mais importante das edificações, onde os fenômenos de radiação são essencialmente solares. A densidade de fluxo de radiação incidente em uma superfície por unidade de área, é conhecida como irradiância global ( $G$ ), e é representada em  $\text{W}/\text{m}^2$ . Desta radiação que incide na superfície exterior, uma parte é transmitida para o interior por condução, outra absorvida pelos materiais e a restante refletida. Deduz-se então a importância de estudar a radiação solar incidente nas fachadas e a troca

líquida de radiação entre a envolvente e sua vizinhança, devido à diferença de temperatura entre elas. Existe naturalmente troca de calor por radiação no interior da edificação; no entanto, dadas as baixas temperaturas e emissividades dos demais corpos emissores presentes no ambiente, apenas a radiação emitida pelos sistemas de iluminação assumem um papel relevante (GARCIA, 2013).

Pode-se analisar a transmissão de calor por radiação, de forma simplificada, calculando o fluxo de calor trocado entre as duas superfícies pela Equação 1.5.

$$q = h_r \cdot (T_{S1} - T_{S2}) \quad (1.5)$$

onde  $q$  é a taxa de fluxo de calor transmitido por radiação, em  $W/m^2$ ;  $h_r$  é o coeficiente de troca de calor por radiação em  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$  e  $T_{S1}$  e  $T_{S2}$  são as temperaturas das superfícies em  $^\circ C$ .

O coeficiente  $h_r$  é um parâmetro simplificado, que resume todos os fatores que interferem na troca de calor por radiação, tais como, as temperaturas das superfícies, os aspectos geométricos e físicos das superfícies, principalmente a emissividade ( $\epsilon$ ) e a absorvância ( $\alpha$ ). Para troca de calor entre materiais de construções, em que a maioria deles possui emissividade em torno de 0,9, pode-se adotar, aproximadamente,  $h_r = \frac{5W}{m^2 \cdot ^\circ C}$  (FROTA, 2005).

### 1.3.1.2 Inércia térmica

A inércia térmica é a capacidade de uma edificação reagir às variações de temperatura, ou seja, representa a forma como este responde ao armazenamento e/ou restituição do calor. É uma função direta da sua capacidade térmica, resultante do produto da massa térmica de todos os ocupantes pelo calor específico. Pode ser definida como a capacidade de prolongar o estado transiente e o desfasamento temporal do efeito dos fatores referidos, está diretamente relacionada com a massa exposta ao fluxo de calor, e é proporcional à massa térmica da edificação, mas inversamente proporcional à condutividade térmica, ou seja, resulta da relação entre a capacidade de armazenar e a capacidade de transmitir o calor. Por consequência, a capacidade térmica (a capacidade de uma edificação para absorção de energia) se comporta como um amortecedor térmico, ou seja, que resiste a qualquer tipo de variação de energia. Assim, as construções com materiais leves possuem uma inércia inferior a construções com materiais mais pesados e uma edificação com inércia forte, responde de uma forma mais lenta às mudanças de temperatura. Apesar das ações térmicas exteriores (temperatura exterior, radiação solar, etc.) variarem sazonalmente, o efeito da inércia térmica é uma das condições necessárias, mas não suficientes, para alcançar conforto térmico.

Apesar da complexidade que o cálculo de inércia térmica tem na avaliação do comportamento térmico das edificações, pois seria necessário contabilizar todos os fluxos energéticos ao longo do tempo, para autores como SILVA (2006) por exemplo, a inércia térmica provoca dois importantes efeitos sobre os fluxos de calor entre o ambiente interno das edificações e o meio exterior. Esta pode ser avaliada decompondo a sua ação em dois princípios: amortecimento térmico ( $\mu$ ) e atraso

térmico ( $\phi$ ). O amortecimento térmico atua como redutor das oscilações das temperaturas internas e o atraso térmico entende-se como a defasagem das mesmas em relação às temperaturas externas.

Estes parâmetros podem ser calculados pelas equações 1.7 e 1.8 (KRIEDER, J; RABL, 1994).

$$\phi = \frac{x}{2} \cdot \sqrt{\frac{T}{\sum n \alpha_i \pi}} \quad (1.6)$$

onde  $x$  é a espessura da parede;  $T$  é o período temporal (h);  $n$  o número de elementos e  $\alpha$  a difusividade térmica (m<sup>2</sup>/h).

A difusividade térmica é o índice que reflete a facilidade com a qual o material sofre uma variação de temperatura.

$$\alpha = \frac{\lambda}{d \cdot c_e} \quad (1.7)$$

onde  $d$  é o peso específico do elemento (kg/m<sup>3</sup>);  $\lambda$  a condutividade térmica (kcal/h.m.°C) e  $c_e$  o calor específico (kcal/kg.°C).

A inércia térmica é função da massa térmica da edificação, ou seja, do calor armazenado, e pode ser representada pela Equação 1.8.

$$\Delta q = m \cdot c_e \cdot \Delta T \quad (1.8)$$

onde  $m$  é a massa do elemento (kg) e  $c_e$  é o calor específico (kcal/kg.°C).

Outra forma de caracterização da inercia térmica é através da constante de tempo, calculada a partir da Equação 1.9.

$$t = R \cdot C_p \quad (1.9)$$

onde  $R$  é a resistência térmica da superfície (m<sup>2</sup>K/W) e  $C_p$  a capacidade térmica (Wh/m<sup>2</sup>K).

## 1.3.2 Efeitos Térmicos de Materiais e Sistemas

### 1.3.2.1 Materiais isolantes térmicos

A utilização de materiais construtivos adequados ao clima local, a aplicação de conceitos de eficiência energética para controle da radiação solar e da transferência de calor para o interior da edificação são alguns dos principais parâmetros a serem considerados, e entre eles está o uso de isolantes térmicos como elementos chave para aumentar a eficiência nas edificações (BOOSTANI; MIRZAPOUR, 2015). Diversos estudos são registrados sobre o efeito de isolamento em termos de tempo de atraso térmico e baixo fator de decremento.

KAYNAKLI (2012) realiza uma revisão da literatura sobre a determinação da espessura ideal do material de isolamento térmico em um invólucro da edificação e seu efeito no consumo de energia, apresentando comparativamente os resultados, os procedimentos de otimização e os métodos de análise econômica. Os efeitos dos parâmetros de isolamento e outros parâmetros de construção do consumo de energia em edificações e sobre emissões ambientais foram investigados, incluindo uma revisão dos sistemas de isolamento térmico (tanto para o envelope de construção como para outras aplicações), o procedimento de otimização e um exemplo de aplicação prática. Para YU *et al.* (2015) há duas formas básicas de incrementar o desempenho do isolamento térmico das paredes. Uma é melhorar a capacidade do isolamento do material e a outra é aumentar a espessura do material, sendo o material com diversas espessuras a prática mais usada. Os benefícios alcançados são em função da quantidade de energia elétrica usada para condicionamento de ar em edificações, criando uma relação entre o investimento e a economia dos sistemas. Os autores analisam o total da energia consumida em uma edificação residencial rural (kWh) em função da transmitância térmica das paredes, demonstrando que com uma variação na transmitância do material isolante nas paredes externas de  $0,3 \text{ W.m}^2 \text{ K}$ , consegue-se uma redução de 13% do consumo anual de energia.

DYLEWSKI; ADAMCZYK (2011) analisam o impacto ambiental dos materiais de construção utilizados para a construção de uma parede externa, especificamente materiais isolantes térmicos, avaliando esse impacto negativo através de permutações dos materiais utilizados. O estudo compreende a fase de produção de materiais de construção, incluindo a fase de matérias-primas e energia necessária para produzi-los e a fase de uso (chamada fase energética), demonstrando que o isolamento térmico da parede externa de uma edificação resulta em redução de custos energéticos devido à redução da demanda de energia necessária para o condicionamento do prédio. AKTACIR *et al.* (2010) avaliam a influência do isolamento térmico sobre a carga térmica para refrigeração e o sistema de arrefecimento em um estudo de caso de ar condicionado central na região quente e úmida na Turquia, determinando que quando construído e isolado de acordo com as normas vigentes, consegue-se uma economia monetária considerável. Neste mesmo contexto, FERTELLI (2013) estuda a influência da espessura do isolamento em seis tipos diferentes de paredes em 4 cidades na Turquia, avaliando a poupança de energia e períodos de retorno. Os resultados mostram que a poupança de energia é maior, o isolamento é mais eficaz e o período de recuperação é mais curto para cidades com maiores necessidades de energia para condicionamento de ar.

### **1.3.2.2 Sistemas BAPV e BIPV e seus efeitos nas cargas térmicas**

O abastecimento de energia na edificação com sistemas fotovoltaicos acrescentou tecnologias que criam uma nova área de interesse, não só por causa da produção local de eletricidade, mas também para o efeito sobre o comportamento térmico das edificações. Tanto nos

sistemas BAPV (adaptado à construção), quanto nos BIPV (integrado à edificação) é evidente que os sistemas fotovoltaicos exercem uma influência significativa na transferência de calor entre o envelope e a edificação, com seus efeitos consequentes nas cargas térmicas (YANG; ATHIENTIS, 2014). DOMINGUEZ *et al.* (2011), na Califórnia-EUA, analisam, através de medições e simulações, os benefícios de sistemas fotovoltaicos em telhados para isolamento térmico e sua influência nas cargas internas como parte dos benefícios indiretos. Estudos realizados por KAPSALIS *et al.* (2012) na Grécia evidenciam a influência do telhado fotovoltaico nas cargas térmicas e seu comportamento térmico, demonstrando o impacto positivo dos sistemas sobre as cargas pico de demanda de refrigeração. SHAN *et al.* (2014) fazem análise com diversas configurações de coletores fotovoltaicos-térmicos e a influência na carga térmica do interior de uma edificação, e SCHERBA *et al.* (2011) avaliam o calor sensível com módulos fotovoltaicos nos telhados. FINLAY (2013) compara alternativas de sombreamento com sistemas fotovoltaicos no átrio de uma edificação educacional na Inglaterra, e discute a percepção do usuário da edificação.

Na Região Amazônica, caracterizada pela alta irradiação solar recebida durante todo o ano, ainda são necessários incentivos para estimular a inserção de sistemas de geração de energia a partir de fontes renováveis. No âmbito tecnológico, as pesquisas e aplicações se concentram na utilização direta no telhado das edificações para produção de energia (MÂCEDO *et al.*, 2008) (MACÊDO *et al.*, 2010). Os estudos sobre os possíveis benefícios indiretos se resumem à descrição como elemento construtivo para geração de energia e/ou como dispositivo de sombreamento (LONGO *et al.*, 2013). Entretanto, pelas características climáticas da região de elevadas temperaturas associadas à alta umidade, considera-se que alcançar condições adequadas de conforto no espaço construído é um dos grandes desafios e, portanto, requer estudos detalhados sobre a influência dos diversos elementos construtivos e a influência que um sistema fotovoltaico exerce sobre o comportamento térmico e energético de uma edificação.

## 1.4 SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO E ENERGÉTICO

O processo de simulação consiste em empregar técnicas matemáticas em computadores, com o propósito de imitar um processo ou operação do mundo real. Desta forma, é necessário construir um modelo computacional que corresponda à situação real que se deseja simular. Os casos mais habituais onde se usam as simulações são:

- Para descrever o comportamento de um sistema. A simulação pode servir para mostrar como um sistema funciona, por não se conhecer seu desempenho na prática.
- Quando a realização de experimentos é dispendiosa, pois no caso da simulação não são necessários grandes investimentos;
- Quando a realização de experimentos não é adequada, como por exemplo, funcionamento

de sistemas de condicionamento de ar; transferência de calor por superfícies; entre outros.

Em passado recente, poucas edificações se beneficiavam da análise de energia. Atualmente os simuladores de análise energética tornaram-se mais comuns e estão sendo aplicados durante o processo de concepção e planejamento, e alguns países escolheram ou criaram suas próprias ferramentas para aplicação da normativa de certificação das edificações. Neste trabalho são estudadas ferramentas de simulação selecionadas pelo seu enfoque e características, para determinar a escolha da ferramenta que forneça os resultados necessários para a elaboração do trabalho e adequada simulação do caso em estudo.

Em termos gerais, as ferramentas de simulação de edificações e sistemas são concebidas para calcular cargas horárias de pico durante o período de aquecimento ou resfriamento, com base nos métodos tradicionais de cálculos de carga e de energia nos sistemas de calefação, ventilação e condicionamento de ar. A maioria delas baseiam seus procedimentos em algoritmos estabelecidos pela ASHRAE; entretanto, muitas são de propriedade de empresas e os produtos são distribuídos ou vendidos por fabricantes de equipamentos.

Essas ferramentas permitem analisar a edificação de forma dinâmica e facilitam a compreensão das relações entre os parâmetros de projeto, forma arquitetônica e as características de uso da mesma. No desempenho térmico os cálculos são feitos em duas vertentes principais: cálculo de cargas e cálculo energético. O propósito de calcular as cargas é determinar as cargas térmicas de pico dos sistemas de calefação, ventilação e resfriamento do ar, com a finalidade de dimensionar, selecionar e/ou definir os equipamentos mecânicos de HVAC, quando necessário, ou de avaliar o sistema instalado. O propósito do cálculo energético é prever o consumo e estimar os requerimentos de energia ao longo do ano inteiro ou do período solicitado. Atualmente esses programas costumam realizar ambas as tarefas, sendo que, se necessário, podem ser realizadas isoladamente uma da outra. A Figura 1.9 mostra o diagrama de blocos das fases necessárias em um processo de simulação de uma edificação.

A simulação térmica e energética de uma edificação converte-se então em uma ferramenta valiosa para o desenvolvimento de códigos de edificações, conhecidos mundialmente como *Building Energy Codes* (BEC), e para a avaliação do desempenho energético das edificações. Os programas de simulação são utilizados para determinar o consumo de energia de uma edificação, pois uma ferramenta mais simples de avaliação não seria capaz de determinar o real desempenho energético que implica um complexo sistema de produção de energia, em que os diferentes sistemas de construção interagem entre si, com o ambiente externo e a interação do usuário (CHWIEDUK, 2003). Essa dificuldade é mais realçada quando se consideram o zoneamento bioclimático do lugar e a concepção da edificação, onde as ferramentas de simulação são capazes de lidar com a complexidade da interação térmica da edificação (AWAWDEH; TWEED, 2011).

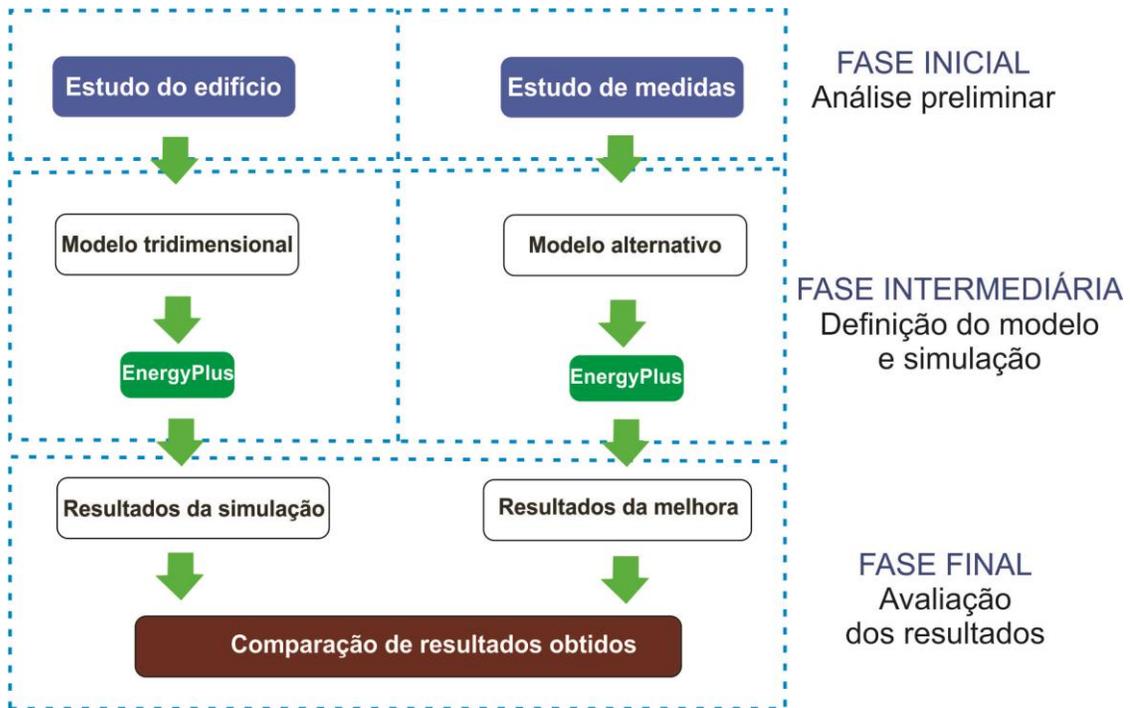


Figura 1.9. Diagrama de blocos para simulação.

Igualmente, os efeitos de qualquer tipo de mudança feita no sistema ou edificação também podem ser simulados e observados em um curto tempo, diminuindo os custos que seriam requeridos estudando alternativas reais. Com isso, os sistemas e as possíveis mudanças podem ser avaliadas e obter informações detalhadas sobre o consumo energético da edificação, as condições ambientais internas, e o desempenho dos equipamentos, para posterior avaliação e seleção do sistema a ser usado.

Tanto no cálculo de cargas quanto no cálculo energético, a análise pode ser dividida em diversos campos:

- Análise integral da edificação - abrange aspectos como simulação de consumo e demanda de energia, cálculo de cargas, geração de energia com fontes renováveis, avaliação de *retrofit* e edificações sustentáveis;

- De componentes padrão - referem-se a materiais, componentes, equipamentos e sistemas que podem ser analisados separadamente, como sistemas de envoltória, equipamentos e sistemas de condicionamento de ar e sistemas de iluminação artificial;

- Outras aplicações também podem ser avaliadas como: poluição atmosférica, economia de energia, qualidade do ar interior, múltiplas instalações no edificação, análise climática e solar, ensino e avaliação de sistemas, ferramentas de validação, sistemas de ventilação e infiltração, conservação e uso de águas, etc.

No contexto dos projetos arquitetônicos, as aplicações comumente concentram-se em:

- Simulação energética das edificações (completa) - é a mais importante e pode ser feita em intervalos de tempo;
- Simulação de iluminação e luz natural - está focada nos aspectos da luz natural e seus efeitos no rendimento energético e visual;
- Simulação de sistemas solares - os sistemas solares ativos e passivos podem ser modelados usando os programas ou módulos projetados para componentes e equipamentos.

### **1.4.1 Programas de Simulação. Características e Utilidades**

Em um processo de simulação de projetos arquitetônicos e os sistemas da edificação, inicialmente são inseridas as descrições da edificação, os parâmetros construtivos e o arquivo climático, atuando como condições limites. Os resultados no arquivos de saída são dados sobre desempenho energético, demanda de pico e condições ambientais internas. O objetivo principal, usualmente, é buscar o modelo ideal que proporcione condições interiores confortáveis enquanto mantendo níveis aceitáveis de consumo de energia, para otimizar o rendimento do sistema, ou comparar as diversas opções de projeto com base nos custos de ciclo de vida. Os elementos principais da simulação energética são: modelo da edificação; modelo dos sistemas de HVAC, e modelo de equipamentos do HVAC.

Uma série de pesquisas comparativas de programas de simulação têm sido publicadas, dentre as quais: CRAWLEY (1996) em relatório do *U.S. Department of Energy*. apresenta um primeiro diretório de ferramentas de avaliação de energia em edificações. Este relatório engloba o conteúdo inicial do diretório de ferramentas para análise de energia nas edificações lançadas até 1996. Posteriormente, WALTZ (2000) publicou de forma concisa contatos e outras informações básicas sobre uma variedade de ferramentas de análise de energia da edificação, custo do ciclo de vida e taxa de utilização e serviços. O foco da apresentação é sobre os dados utilizados para a construção de um modelo, análise dos resultados, diagnóstico de problemas, e calibração do modelo com edificações do mundo real. JACOBS; HENDERSON (2002) abordam um levantamento dos requisitos do usuário (arquitetos, engenheiros e empresas de construção) para estudo da edificação completa, dos sistemas de envoltória, dos componentes e sistema HVAC, mediante programas de simulação e ferramentas de projetos. A publicação avalia as ferramentas existentes em relação aos requisitos do usuário e fornece recomendações para mais desenvolvimento de ferramentas. PARADISE (2010) faz uma descrição indicativa dos principais programas utilizados para análise de programas de energia, abordando desde a fase de utilização no processo de projeto até a avaliação dos resultados, classificando-os em 4 tipos genéricos:

- Ferramentas de triagem, para uso principalmente durante a orçamentação e programação de

*retrofits*;

- *Architectural Design Tools*, para uso principalmente durante a programação, esquemas e desenvolvimento de projeto de novas construções e grandes *retrofits*;

- Ferramentas de cálculo de cargas e dimensionamento de HVAC, para uso principalmente durante o desenvolvimento do projeto e documentação de construção de novas construções e grandes *retrofits*, e

- Ferramentas de avaliação econômica, para uso em todo o processo de *design*.

HENSEN e LAMBERTS (2011), em cooperação com *the International Building Performance Simulation Association* (IBPSA), apresentam contribuições de diversos especialistas, oferecendo uma visão geral única e abrangente de simulação de desempenho da edificação, de ciclo de vida completo, desde a concepção até o final da vida útil. Os autores realizam uma avaliação sobre o papel de simulação no desempenho de edificações, baseada em projetos de construção e operação de sistemas ativos de energia. Os autores abordam também, estudos sobre desempenho das edificações em relação à demanda de energia, qualidade interna do ambiente (incluindo visual, qualidade do ar interior e fenômenos térmicos e de umidade), HVAC e desempenho do sistema de geração com fontes renováveis.

O número de *Building Energy Modelling Programs* (BEMP) atualmente no mercado supera os 500 *programas*, sendo muitos deles de acesso livre. São programas usados para avaliar a eficiência energética, o uso de fontes renováveis de energia e a sustentabilidade em edificações (EERE, 2018). No entanto, de acordo com vários autores citados por TZOULIS (2014), grandes discrepâncias nos resultados da simulação podem existir entre os diferentes programas, gerando dúvidas sobre se alguns BEMP são melhores do que outros. Para compreender esses problemas, é essencial identificar as diferenças e o efeito nos resultados de simulação. Essas diferenças nos resultados podem ser causadas devido a questões matemáticas (interpolação, redução, erros de discretização, etc.), problemas nos valores padrão, ou diferenças nos métodos de cálculo e processos de modelagem.

A abordagem feita pelos diversos países para controle e organização no desenvolvimento deste tipo de programa é diversa. A comunidade europeia, por exemplo, não dispõe de um organismo que centraliza e unifica esses processos, ao modo americano, que designa um organismo que registra todos os programas (EERE, 2018). Na Dinamarca, o Instituto Danes para Pesquisa em Edificações é a principal instituição dedicada à pesquisa sobre simulação em edificações; na Inglaterra, o ESP-r, da Universidade de Strathclyde em Glasgow, é um programa de código aberto; na Suécia o IDA-ICE é um programa comercial com motor de simulação e módulos de várias aplicações, das quais para edificações especificamente é o módulo *ICE (Indoor Climate and Energy)* (ATECYR, 2008). Em BEMP é mais comum encontrar empresas que produzem programas comerciais para a introdução de módulos em programas de código aberto desenvolvidos nos EUA. Por exemplo, o IISIBAT, do *Centre Scientifique et Technique du Bâtiment* (CSTB), que

utiliza como núcleo de cálculo o TRNSYS; o DESIGNBUILDER na Inglaterra, como interface do EnergyPlus; entre outros.

Especificamente no Brasil, para atender os regulamentos nacionais: RTQ-C e RTQ-R, o programa computacional de simulação deve atender alguns pré-requisitos específicos: (MDIC, 2013b).

- Ser um programa para análise do consumo de energia de edificações;
- Ser validado pelos testes da ASHRAE Standard 140;
- Ter capacidade de simulação para as 8.760 horas de um ano;
- Permitir a modelagem de usos de sistemas e ocupação com variação horária;
- Simular o efeito de inércia térmica;
- Calcular interações multi-zonas;
- Ter a capacidade de simular as estratégias bioclimáticas adotadas no projeto avaliado;
- Autodimensionar o sistema de condicionamento de ar;
- Emitir relatórios horários de trocas de ar e infiltração de ar;
- Emitir relatórios horários de temperatura operativa ou temperatura do ar e temperatura radiante média;
- Emitir relatórios de consumo de energia para refrigeração e aquecimento.

Assim, para decidir qual ferramenta de análise do desempenho térmico e energético de uma edificação é melhor para o projeto, é importante ter uma compreensão básica de como estas ferramentas operam. A comparação foi baseada em informações dos fabricantes nas seguintes categorias: características de modelagem geral, cargas da zona, pacote da construção, iluminância e radiação solar, infiltração, ventilação e fluxo de ar entre zonas, sistemas de energias renováveis, sistemas e equipamentos elétricos, sistemas de refrigeração, equipamentos de refrigeração, emissões ambientais, avaliação econômica, disponibilidade de dados de clima, relatórios de resultados, validação, interface de usuários, *links* para outros programas, e disponibilidade.

#### **1.4.1.1 TRNSYS (*TRaNsient SYstem Simulation*)**

O simulador TRNSYS (*TRaNsient SYstem Simulation*) foi desenvolvido pelo *Solar Energy Laboratory - University of Wisconsin* (EUA), e é utilizado para simular o funcionamento de sistemas, incluindo edificações mono e multizonas. Apesar de não possuir ferramentas de desenho ou visualização, o programa apresenta um lado versátil: a natureza modular facilita a inserção de equações, novos modelos matemáticos e a modificação das metodologias de cálculo. Os componentes podem ser facilmente compartilhados entre usuários, sem recompilar o programa, graças ao *drop-in* em tecnologia DLL. É um programa concebido para resolver problemas complexos em um sistema de energia, pois permite desmembrar o problema em uma série de componentes menores. Os componentes TRNSYS podem ser tão simples quanto uma bomba ou um tubo, ou tão complicados quanto um modelo de construção multi-zona (CRAWLEY et al.,

2005). Concluí-se que componentes simples e estratégias de controle ou operações de pré e pós-processamento também podem ser implementados diretamente no arquivo de entrada, utilizando equações simples que suportam os operadores matemáticos e lógicos usuais, e pode usar as saídas de outros componentes. Este programa possui grande difusão de uso e versatilidade. PALME (2010), ao fazer análise das vantagens, classifica-o como um dos melhores exemplos de programa para calcular, usando o método de elementos finitos, o e intercâmbios térmicos nos ambientes.

#### **1.4.1.2 BLAST (*Building Loads Analysis and System Thermodynamics*)**

É um conjunto abrangente de programas para a previsão de consumo de energia e do desempenho do sistema de energia e custos em edificações, desenvolvido pelo *U.S. Army Construction Engineering Research Laboratory (USA CERL)* e a Universidade de Illinois (EUA). O programa BLAST pode ser usado para analisar o desempenho energético de edificações novas ou *retrofit* em construção, com opções de *design* de qualquer tipo e tamanho. Além de determinar a carga de pico no *Date Design Day (DDY)*, realiza os cálculos necessários para o dimensionamento de equipamentos mecânicos, e também estima o desempenho anual de energia da instalação, que é essencial para o projeto de energia solar e de cogeração, por exemplo.

O BLAST contém três blocos ou subprogramas: predição de cargas no ambiente, simulação de sistema de ar e simulação de equipamentos de planta. O subprograma predição de cargas no ambiente calcula cargas horárias no edificações com base em dados meteorológicos e dados do usuário, detalhando a construção do edificações e sua operação. O eixo central é a previsão de cargas no ambiente por balanço de calor, para cada hora simulada, onde o BLAST executa um balanço térmico para cada superfície de cada zona descrita e um balanço de calor para o ar ambiente (CRAWLEY et al., 2005). Os recursos do BLAST foram incorporados ao EnergyPlus (NBIS, 2013).

Destaca-se como ponto importante o uso de algoritmos detalhados de balanço de calor, que permitem a análise do conforto ambiental e outros fatores que não podem ser analisados em programas com modelos de zonas menos rigorosos. Porém, para sua operação requer-se um alto nível de experiência.

#### **1.4.1.3 DOE 2.2E**

O DOE prevê o uso de energia horária, o custo de energia de uma edificação com arquivo climático dado, geometria da construção, descrição do sistema HVAC e a estrutura tarifária. Usando o DOE-2.2E, o projetista pode determinar a escolha dos parâmetros de construção que melhorariam a eficiência energética, mantendo conforto térmico e custo-eficiência. O DOE-2.2E tem um subprograma para o processamento dos dados de entrada (*BDL Processor*), e quatro subprogramas de simulação (*Loads, Systems, Plant and Econ*). *Loads, System e Plant* são executados

em sequência, com a saída de *Load* tornando-se a entrada de *System*, etc. A saída de *Plant* torna-se então a entrada de *Econ*. Cada um dos subprogramas de simulação também produz relatórios dos resultados de seus cálculos. O processador *The Building Description Language* (BDL) lê os dados de entrada e calcula fatores de resposta para o calor transiente, fluxo de calor em paredes e fatores de ponderação para a resposta térmica de espaços de construção. Em ciclos horários, analisa toda a energia da construção, calculando o desempenho energético e o custo do ciclo de vida de operação. Outros usos incluem o desenvolvimento e a implementação de padrões de eficiência energética e de certificação de conformidade, além de contribuir para a formação de novos grupos, em escolas de arquitetura e engenharia, de profissionais conscientes da eficiência energética na construção (NBIS, 2013). O DOE-2.2E tem sido amplamente utilizado por mais de 25 anos em estudos, tanto para projetos de edificações quanto para análise de oportunidades de *retrofit*, e para o desenvolvimento e testes de padrões de uso de energia em edificações nos EUA e em todo o mundo. O setor privado adaptou o DOE-2.1E, criando mais de 20 interfaces que o tornam o programa mais fácil de usar (CRAWLEY et al., 2005).

Entre seus pontos fortes podem ser citados: nível de detalhamento, possibilidade de análise horária, análise energética de uma edificação inteira, de múltiplas zonas em edificações de concepção complexa, amplamente reconhecido como referência de BEMP. A principal barreira é a necessidade de alto nível de conhecimento e domínio de informática por parte do usuário.

#### 1.4.1.4 ENERGYPLUS

O EnergyPlus baseia-se no melhor do BLAST e do DOE-2. O desenvolvimento dessas ferramentas começou na década de 1970, quando o Departamento de Defesa dos EUA começou a financiar o programa que se tornou o BLAST e o Departamento de Energia começou a financiar o programa DOE-2. O objetivo do EnergyPlus é pegar as melhores características do DOE-2 e BLAST e uni-los em um único programa que oferece novas ferramentas de análise para tecnologias de construção de ponta, que não tinham sido incorporadas no *programa* antigo.

O EnergyPlus surge como resultado de uma simulação integrada (simultânea de cargas e sistemas) para fornecer dados de temperatura exata e previsão de conforto. As cargas calculadas (por mecanismo de balanço térmico) e o tempo especificado pelo usuário (15 minutos por *default*) são passados para o módulo de simulação de sistemas da edificação no mesmo intervalo de tempo. O módulo de simulação de sistemas, com um passo de tempo variável (até um minuto, se necessário), calcula o aquecimento e a refrigeração do sistema e do equipamento e o consumo de energia desses sistemas no intervalo simulado. Esta solução integrada oferece previsão mais precisa espaço-temperatura, crucial para o cálculo do tamanho do sistema e equipamentos, o conforto e saúde dos ocupantes. A simulação integrada também permite aos usuários avaliações reais dos sistemas de controle, absorção e evaporação de umidade em elementos de construção, sistemas de refrigeração e de aquecimento radiante, e o fluxo de ar entre as zonas. O EnergyPlus possui dois

componentes: um módulo de simulação de balanço de calor e massa, e um módulo de simulação dos sistemas da edificação. O projetista dos sistemas da edificação lida com a comunicação entre o mecanismo de balanço de calor e os vários módulos HVAC e *loops*, como serpentinas, caldeiras, *chillers*, bombas, ventiladores e outros equipamentos/componentes (CRAWLEY et al., 2005).

Para o cálculo de geração solar fotovoltaica, o módulo “*Photovoltaics*” inclui três modelos diferentes, denominados “simples”, “equivalente de um diodo”, e “Sandia”. A escolha do modelo determina os modelos matemáticos (e dados de entrada) a serem usados para determinar a energia produzida pelos painéis fotovoltaicos. A Tabela 1.2 mostra quais elementos do BLAST e do DOE-2 estão presentes no EnergyPlus.

As características gerais positivas mais marcantes são: exatidão; capacidade de simulação detalhada através de modelos complexos; entrada orientada para o modelo “objeto”; interface adequada usando modelo *standard* de arquitetura e gerando geometria para programas de CAD; arquivos climáticos para mais de 550 localidades do mundo e adequados para ventilação. A falta de uma interface gráfica própria é a principal deficiência encontrada.

Tabela 1.2. Elementos do BLAST e do DOE-2 no EnergyPlus.

<b>BLAST</b>	<b>DOE-2</b>
Soluções técnicas simultâneas	Iluminação natural
Combinação de massa e transferência de calor	Modelos de equipamentos e sistemas
Aquecimento e resfriamento radiante	Capacidade dos sistemas
Modelos e sistemas	Sombreamento das janelas
Métodos de balanço de calor	Vidros controláveis
Convecção interior	Cálculos de poluição atmosférica
Modelos de resfriadores	Modelos de céus
Massa interna	Infiltração avançada
Conforto térmico	

#### 1.4.1.5 EQUEST

É uma ferramenta de análise de uso de energia na edificação fácil de usar, que fornece resultados de nível profissional com um nível acessível de esforço. Isto é realizado através da combinação de um assistente de criação da edificação, um assistente de medida de eficiência de energia e uma apresentação gráfica do módulo de resultados com um programa de simulação avançado, o DOE-2.2 (CRAWLEY et al., 2005). Oferece vários formatos gráficos para visualização do resultado da simulação. Por exemplo, os gráficos da simulação energética global da edificação com os dados anuais ou mensais, ou comparando o desempenho da edificação com *designs* alternativos. Além disso, o EQUEST permite executar várias simulações e ver os resultados alternativos nos gráficos lado a lado.

#### 1.4.1.6 DAYSIM/RADIANCE

O programa Daysim/Radiance, desenvolvido pelo *National Research Council Canada* (NRCC) em conjunto com o *Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems*, na Alemanha, foi elaborado com o intuito de calcular as iluminâncias para o período de um ano, de forma rápida e considerando a variação das condições de céu (REINHART., 2015). Este programa simula a iluminação natural através do coeficiente da luz natural (DC), baseando-se no programa Radiance, que utiliza o método do raio traçado, e no modelo de céu desenvolvido por PEREZ *et al.* (1990), para desta forma possibilitar a simulação das iluminâncias sob qualquer condição de céu (REINHART; WALKENHORST, 2001). A simulação é realizada a partir de um modelo tridimensional do ambiente a ser analisado, onde são definidas as propriedades ópticas das superfícies, e do arquivo climático, de onde são retirados dados como latitude, longitude e radiação. Além do cálculo das iluminâncias, o programa permite o cálculo do FLD (Fator de Luz Diurna) para cada ponto de referência. Outra possibilidade é a verificação do consumo da iluminação artificial de acordo com diferentes padrões de uso (número de pessoas no local e horas de permanência), iluminância de projeto e potência e sistema de controle da iluminação artificial (RAMOS, 2008).

Em descrição do programa, LIMA (2016) descreve brevemente quatro executáveis principais do Daysim:

- O *gen-directsunlight* gera dados de radiação solar direta para o efeito de ofuscamento na localização dos sensores, para o ano todo com base no arquivo climático;
- O *gen-dc* gera os coeficientes de luz natural direta e difusa e calcula diversos coeficientes de luz natural ao mesmo tempo, utilizando o método do raio traçado;
- o *ds-illum* combina os coeficientes de luz natural gerados com os dados de radiação do arquivo climático, para gerar as iluminâncias nos sensores em todos os intervalos de tempo simulados, utilizando o modelo de céu proposto por PEREZ *et al.* (1990);
- o *ds-el\*lighting* pós-processamento gera os dados dos indicadores de desempenho (iluminância útil, autonomia de luz natural, etc., em arquivos de extensão .DA) bem como perfis de acionamento das lâmpadas e protetores solares (arquivos de extensão.csv) e um relatório dos resultados. O acionamento e modificação do estado das lâmpadas e protetores pode ser automático (com base apenas no *setpoints* definidos) ou pelo usuário (com base nos *setpoints* e no perfil de usuário - ativo ou passivo), opção na qual o programa utiliza o modelo comportamental *lightSwitch* mencionado.

#### 1.4.2 Panorama Nacional

No início da década de 1990, programas de simulação horária como o DOE-2.1E e o ESP-r foram trazidos para o Brasil e as pesquisas em simulação foram direcionadas ao estudo de

desempenho térmico e energético de edificações. Porém, a falta de arquivos climáticos compilados para esses programas dificultava a simulação de edificações no país. O desenvolvimento de ferramentas nacionais é pouco expressivo, podendo-se citar algumas ferramentas como:

O UMIDUS, que permite a simulação da transferência de calor e umidade em estruturas porosas de edificações, e o SPTE, utilizado para estimar o desempenho térmico de componentes construtivos através de funções de transferência (MENDES, 2005).

O programa ARQUITROP, da Universidade Federal de São Carlos - UFSCar, desenvolvido na década de 1980, foi amplamente utilizado por arquitetos e estudantes de arquitetura, para analisar a influência de alternativas de projeto no consumo de energia elétrica em edificações, através do método das funções de transferência. Esse programa que permite a simulação do desempenho térmico de um ambiente monozona através do método da admitância. Fornece a variação da temperatura interior ao longo de um dia (o usuário pode escolher o dia e o mês) e os ganhos de calor totais devido aos vários componentes na data escolhida. Possui um banco de dados climáticos de cidades brasileiras e um banco de materiais e componentes construtivos. Sua interface encontra-se em MS-DOS, o que dificulta o seu uso (NICOLAU; CHVATAL, 2010).

O Grupo de Estudos em Conforto Ambiental (GECA), da Universidade Federal de Alagoas -UFAL, tem utilizado ferramentas de simulação para a análise da contribuição de luz natural em edificações, com o programa LUMENMICRO (MENDES, 2005), e simulação da ventilação natural em edificações, através de CFD, usando o programa PHOENICS (PEIXOTO; BITTENCOURT, 2003).

#### **1.4.2.1 DOMUS PROCEL EDIFICA**

O DOMUS é um programa de Simulação Higrotérmica e Energética de Edificações, desenvolvido pelo Laboratório de Sistemas Térmicos da Pontifícia Universidade Católica do Paraná - PUC-PR e a Eletrobras, no âmbito do PROCEL EDIFICA. Desenvolvido a partir de 1998, é um programa concebido para simular edificações compostas de múltiplos ambientes, modelando a transferência combinada de calor e de umidade em elementos porosos, de forma a permitir análises de desempenho higrotérmico de elementos construtivos quando estão sujeitos a qualquer tipo de condição climática. Nele, são levados em conta os fenômenos de difusão e capilaridade, ou seja, a transferência de umidade nos estados líquido e gasoso através de paredes, telhados e outros componentes pode ser considerada. O modelo prevê perfis de umidade e temperatura em qualquer elemento poroso da edificação, calculando fluxos de massa de água e de calor sensível e latente para qualquer intervalo de tempo de simulação, graças ao seu algoritmo robusto para solução simultânea das equações principais. O programa foi construído em uma linguagem orientada a objetos, para ser um *programa* de fácil uso, capaz de permitir a fácil simulação de edificações tipicamente brasileiras. Com interface de fácil uso, possibilita que projetistas de sistemas de climatização determinem os ganhos térmicos de forma muito mais rápida e precisa, evitando o

superdimensionamento de um equipamento. Permite também aos profissionais da área de energia avaliar, de forma simples, alternativas de climatização passiva, reduzindo desperdícios.

O programa incorpora características do *programa* UMIDUS, aumentando seus potenciais de simulação higrotérmica. Uma das características especiais deste programa é sua aplicação didática com interface amigável. O programa também permite a caracterização dos protótipos quanto aos seus componentes construtivos, às cargas de iluminação e de ar condicionado e a seus padrões de uso, seus equipamentos, à quantidade de usuários e suas rotinas de uso. Para isso, devem-se configurar os parâmetros de simulação, com o arquivo climático estabelecido pelo DOMUS, na extensão DWF (*Domus Weather File*), e os intervalos de simulação necessários. Esses arquivos são gerados com um conversor de arquivos, o *Weather Converter*, que converte arquivos no formato TMY, TMY2, TRY e EPW. para DWF. Segundo OLIVEIRA; VELOSO (2012), o usuário pode solicitar relatórios de saída em forma de gráficos e de estatísticas mensais e anuais para cada zona de conforto térmico como: temperatura interna, umidade relativa, Voto Médio Previsto (*Predicted Mean Vote - PMV*) e Porcentagem de Pessoas Insatisfeitas (*Predicted Percentage of Dissatisfied - PPD*), sensação térmica de acordo com a ASHRAE, percepção da qualidade do ar e de conforto nos ambientes naturalmente ventilados. Além disso, fornece dados de energia (ganhos térmicos e demanda de consumo de energia) e perfil de temperatura e umidade, fluxo de calor e de vapor e as radiações direta, difusa e refletida de cada parede. No módulo Sistema de Climatização são fornecidos dados de carga térmica, permitindo a análise de diferentes parâmetros tais como:

- Consumo e demanda de energia;
- Conforto térmico segundo diferentes índices;
- Risco de crescimento de mofo e de condensação;
- Dimensionamento de sistemas de climatização;
- Avaliação do nível de eficiência energética para edificações comerciais, de serviços e públicas, em conformidade com o RTQ-C;
- Influência climática;
- Monitoramento de sistemas centrais de condicionamento de ar.

A nível local, considera-se importante destacar programas criados no grupo de pesquisa, sobre edificações eficientes e geração fotoelétrica.

- **Programa EDEN:** Programa em linguagem de programação Visual Basic 6.0®, para auxílio ao projeto de edificações com características eficientes e de baixo consumo de energia. O programa é constituído por cinco módulos, que auxiliam o usuário no desenvolvimento de sua tarefa, a saber: "Análise Bioclimática", "Rosa dos Ventos", "Sombreamento", "Iluminação Natural" e Geração Fotovoltaica" (BRITO, 2003).

- **Sistema para Monitoração:** Desenvolvimento e implantação de um sistema para monitoração do desempenho energético de edificações, no ambiente LABVIEW, com o objetivo

de monitorar principalmente as variáveis climáticas e aquelas referentes à geração e ao consumo de energia elétrica de uma edificação (MANITO, 2012).

- **Ferramenta computacional para dimensionamento e avaliação de desempenho de SFCR:** Propõe modelos representativos do comportamento da potência elétrica em situações de limitação de potência do inversor e das perdas elétricas em função do carregamento. Implementada computacionalmente no ambiente GUIDE do MATLAB, a ferramenta permite a análise, auxilia no dimensionamento, e viabiliza a simulação da operacionalidade e consequente contribuição energética de SFCR com diferentes capacidades de potência (PINTO FILHO, 2012).

## 1.5 SIMULAÇÕES PARA O CASO EM ESTUDO

### 1.5.1 Simulação Termo-energética

Para calcular os processos térmicos e energéticos da edificação, recorre-se ao programa EnergyPlus (2013) pela possibilidade de simular a edificação separadamente dos sistemas e da geração solar fotovoltaica. O programa oferece também a possibilidade de cálculos energéticos e térmicos simultaneamente durante o mesmo intervalo de tempo, além da possibilidade de integração com o programa Daysim/Radiance.

De uma forma geral, são inseridos no programa todos os detalhes relativos ao modelo de simulação, desde propriedades dos materiais, geometria, orientação, caracterização de envolventes, clima, entre outros. Para obter as saídas (*outputs*) o programa calcula a energia necessária para manter as condições interiores selecionadas pelo utilizador, baseando-se nos dados operativos definidos pelo mesmo. A seguir, são descritos os processos principais utilizados pelo programa.

#### 1.5.1.1 Balanço de energia do EnergyPlus

Para a descrição dos balanços de energia e massa em edificações, é necessário recorrer a várias equações (algébricas, diferenciais ordinárias e derivadas parciais), que podem ser integradas recorrendo a métodos numéricos. No que diz respeito à metodologia de cálculo, o EnergyPlus calcula o fluxo de calor que atravessa um determinado elemento opaco através da Equação 1.10 (ENERGYPLUS, 2013). Daqui é possível concluir que o fluxo que atravessa o dito elemento depende essencialmente da radiação solar incidente na superfície exterior, das temperaturas interiores (*i*) e exteriores (*o*), e de fatores de inércia térmica relativos às propriedades dos materiais do elemento (*X e Y*) (GARCIA, 2013).

$$q''_{ko}(t) = \sum_{j=0}^{\infty} X_j T_{o,t-j\delta} - \sum_{j=0}^{\infty} Y_j T_{i,t+j\delta} \quad (1.10)$$

onde  $q''$  é o fluxo de calor;  $T$  é a temperatura;  $i$  é a face interna do elemento;  $o$  é a face externa do elemento;  $t$  é o tempo atual e  $X$  e  $Y$  são fatores de resposta.

Para calcular as temperaturas do ar de uma determinada zona térmica o EnergyPlus recorre à Equação 1.11

$$T_z^t = \frac{\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i^t + \dot{m}_{sys} C_p T_{supply}^t + \left( C_z \frac{T_z}{\delta t} + \sum_{i=1}^{N_z} h_i A_i T_{si} + \sum_{i=1}^{N_z} \dot{m}_i C_p T_{zi} + \dot{m}_{inf} C_p T_{\infty} \right)^{t-\delta}}{\frac{C_z}{\delta t} + \left( \sum_{i=1}^{N_z} h_i A_i + \sum_{i=1}^{N_z} \dot{m}_i C_p + \dot{m}_{inf} C_p + \dot{m}_{sys} C_p \right)} \quad (1.11)$$

onde  $\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i^t$  é a soma das cargas internas por convecção,  $\dot{m}_{sys} C_p T_{supply}^t$  o calor transferido por infiltração e saída dos sistemas de ar,  $\sum_{i=1}^{N_z} \dot{m}_i C_p T_{zi}$  o calor transmitido entre zonas,  $C_p$  calor do ar específico da zona.

A transmissão de calor através das superfícies é calculada por função de transferência (CTFs - *Conduction Transfer Functions*) que relaciona o fluxo de calor de um elemento da superfície com uma série de resultados de ambos os lados. A forma básica de um CTF é mostrada na Equação 1.12 para fluxo em superfícies internas.

$$q_{ki}''(t) = -Z_o T_o(i, t) - \sum_{j=1}^{nz} Z_j T_o(i, t = j\delta) + Y_o T_o(o, t) + \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_o(o, t - j\delta) + \sum_{j=1}^{nq} \theta_j q_{ki,t-j\delta} \quad (1.12)$$

onde:  $Z_j$  é o coeficiente CTF interno,  $j = 0, 1 \dots nz.$ ,  $Y_j$  é o coeficiente CTF cruzado,  $j = 0, 1 \dots nz.$ ,  $\phi_j$ , coeficiente de fluxo de calor  $j = 1, 2 \dots nq.$ ,  $T_i$  é a temperatura da face interna,  $T_o$  a temperatura da face externa, e  $q''$  é a condução de fluxo de calor na face interna.

## 1.5.2 Simulação do Comportamento Lumínico

Para avaliar a contribuição dos sistemas de iluminação natural (vertical e horizontal) e os diferentes critérios de desempenho relacionados à iluminação natural e uso de energia de forma integrada, é utilizado o *programa* DAYSIM/RADIANCE de forma integrada com o *programa* EnergyPlus, considerando o acionamento das lâmpadas apenas quando a luz natural não seja suficiente para atender o uso do ambiente.

### 1.5.2.1 Contribuição da luz natural

Para avaliar a distribuição da iluminação natural no ambiente, o programa utiliza a Iluminância Natural Útil - UDI, que possibilita a verificação da frequência de ocorrência de cada faixa de iluminância. Para esta análise, a simulação é realizada para o período de um ano, durante o horário de trabalho, entre 07 e 18 horas. A partir dos valores das iluminâncias para o período de um ano, durante o horário de trabalho, são verificadas as frequências em que cada faixa de iluminâncias ocorre. As faixas pré-estabelecidas utilizadas são as mesmas determinadas por NABIL; MARDALJEVIC (2005):

a - UDI de contribuição, que compreende as iluminâncias entre 100 lux e 500 lux, onde a iluminação artificial é usada apenas para complementar a natural;

b - UDI de substituição, com as iluminâncias entre 500 e 2.000 lux, onde a iluminação natural substitui totalmente a artificial, sem causar desconforto;

c - UDI excessiva, para as iluminâncias superiores a 2.000 lux, que são consideradas excessivas, podendo causar desconforto visual e/ou térmico.

A partir desta separação das iluminâncias em faixas é possível avaliar a distribuição da iluminação no ambiente, de acordo com o programa de simulação.

## 1.6 PROCESSO DE CALIBRAÇÃO

Segundo CARLO (2008), ao contrário de produtos industrializados, edificações geralmente são únicas, com sistemas e uso diferenciados, mesmo comparando edificações semelhantes, o que dificulta a caracterização de modelos que representam diversas edificações. Modelos de edificações que representam uma população são geralmente chamados de protótipos de edificações e são gerados a partir de uma série de dados adquiridos por levantamentos e tratamentos estatísticos. Quando o modelo a simular não é um protótipo, mas um modelo baseado em uma edificação real, este ainda deve ser calibrado, a fim dos resultados reproduzirem o desempenho térmico mais semelhante possível ao caso real.

Diversas metodologias de calibração foram desenvolvidas; por exemplo, PEDRINI (1997) desenvolveu uma metodologia de calibração dividida em cinco níveis de entendimento da edificação, onde o grau de complexidade das características da edificação, de seus sistemas e do seu uso aumenta à medida que se deseja uma maior exatidão entre o modelo e a realidade. WESTPHAL e LAMBERTS (2005) desenvolveram outro método de calibração baseado em análise de sensibilidade, a fim de reduzir o tempo gasto na calibração. Os autores utilizaram o programa EnergyPlus para definir uma metodologia de seis etapas, que consiste na calibração das potências e padrões de uso de cargas constantes, na simulação de dias de projeto, na análise de

sensibilidade de dados de entrada para verificar os ganhos e perdas térmicas, no ajuste de dados de entrada de grande influência e incerteza, na simulação de um ano completo, e nos ajustes finais.

## 1.7 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Este capítulo abordou a legislação sobre eficiência energética em edificações de maneira geral, destacando normas e programas, tanto em nível nacional quanto internacional, e a forma como os diversos países regularizam suas edificações. Ressaltou-se a importância das edificações de baixo ou nulo consumo de energia para controle mundial do consumo de energia elétrica. Neste contexto, foram apresentadas as Edificações Solares Fotovoltaicas Conectadas à Rede como alternativa viável e eficiente para alcançar edificações com balanço energético positivo.

Foram apresentados os processos que definem o comportamento térmico das edificações e apontadas as ferramentas que permitem analisar de forma dinâmica os processos térmicos nos componentes de uma edificação e facilitam a compreensão dos fenômenos envolvidos. Neste contexto, apresentaram-se as vantagens e desvantagem de algumas ferramentas para simulação dinâmica, concluindo pelo uso do programa EnergyPlus para as avaliações termoenergéticas. Igualmente apresentou-se o Daysim/Radiance como ferramenta dinâmica mais adequada para estimar quantitativamente a iluminação natural e integrá-la a avaliações termoenergéticas. Essas medidas são verificadas através de simulação computacional.

O EnergyPlus apresenta funcionalidade de acordo com as necessidades do trabalho, tais como: solução baseada na técnica de balanço de calor para cargas térmicas, permitindo o cálculo simultâneo dos efeitos de radiação e convecção, tanto na superfície interior como exterior, usando funções de transferência por condução; modelos de conforto térmico baseados na atividade humana dentro da temperatura de bulbo seco, umidade, etc.; dentre outras vantagens.

É importante ressaltar que a escolha pela integração dos programas Daysim e EnergyPlus visa garantir maior confiabilidade aos resultados, já que, segundo DIDONÉ (2009), foi constatado que o EnergyPlus superestima a quantidade de luz natural no interior do ambiente e, conseqüentemente, subestima o consumo de energia elétrica usada na iluminação artificial. RAMOS (2008) apresenta uma comparação entre as iluminâncias internas calculadas através dos programas EnergyPlus, Daysim/Radiance e Troplux. Ambos os autores constataram que os cálculos da parcela de luz refletida interna e das iluminâncias externas fornecidas pelo EnergyPlus foram maiores do que as reais. Em resumo, a utilização conjunta destas duas ferramentas permite a realização de procedimentos combinados para avaliar o potencial de aproveitamento de luz natural para redução do consumo de energia elétrica da edificação.

## 2 ESTUDO DE CASO. LABORATÓRIO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Neste capítulo apresenta-se a edificação do estudo de caso, realizando análise do clima da Região Amazônica, com destaque para a cidade de Belém. Aqui são expostos tanto as características arquitetônicas quanto os materiais e sistemas usados.

Trata-se da caracterização do edifício em estudo com relação à orientação, áreas, ocupação, perfis de uso, potência instalada, consumo, etc.

### 2.1 LOCALIZAÇÃO E CLIMATOLOGIA

#### 2.1.1 Localização

A edificação está localizada na cidade de Belém, estado de Pará, na Região Amazônica Brasileira, com coordenadas  $1^{\circ}28'13''$  de latitude sul e  $48^{\circ}43'45''$  de longitude oeste e uma altitude registrada de 16 m. A Figura 2.1 mostra a localização da edificação.

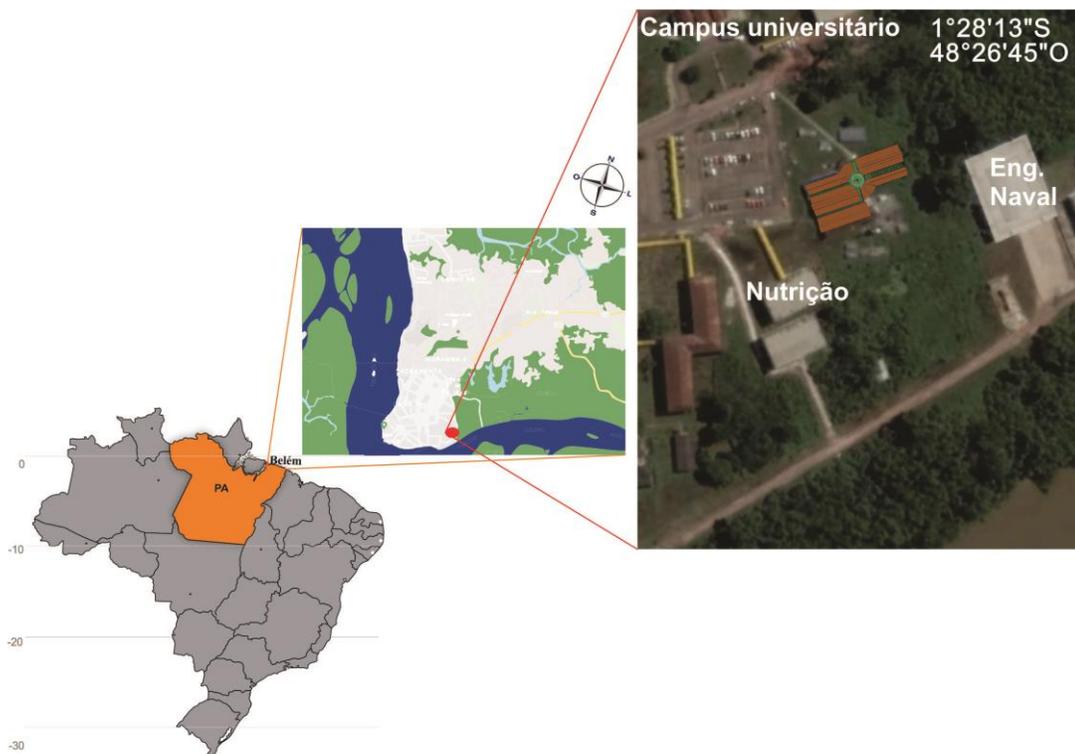


Figura 2.1. Localização da edificação no Campus Universitário. Fonte: Adaptada de Google Earth.

## 2.1.2 Análise Climática

### 2.1.2.1 Zona bioclimática

O território brasileiro está dividido em zonas bioclimáticas, onde cada uma tem relação com as características climáticas das diversas áreas do território, que não obedecem ao mapeamento político ou divisão em estados ou regiões econômicas. A Amazônia Legal Brasileira está inserida na Zona Bioclimática 8, conforme classificação da ABNT 15220 ABNT (2005), com uma pequena porção de território na zona bioclimática 7, e é caracterizada pelas altas temperaturas e altas umidades. A cidade de Belém está inserida na zona bioclimática 8 (Figura 1.1).

### 2.1.2.2 Arquivo climático

No processo de análise do comportamento energético de uma edificação o clima cumpre um papel fundamental. Para isto, é necessário recorrer a dados meteorológicos em zonas próximas ao projeto. Segundo SZOKOLAY (2004), os principais elementos climáticos regularmente medidos pelas organizações meteorológicas e publicados de forma contínua são:

- Temperatura de bulbo seco (TBS), medida geralmente à sombra;
- Umidade, expressada em umidade relativa ou absoluta;
- Ventos medidos, velocidade e direção dos movimentos de ar;
- Chuvas, ou seja, a quantidade total de precipitação, expressa em mm por unidade de tempo (dia, mês, ano);
- Nebulosidade, com base em observação visual;
- Insolação, em horas por dia ou mês;
- Irradiação solar, em Wh/m<sup>2</sup>.

No Brasil o LABEEE (2015) disponibiliza um arquivo climático para diversas cidades brasileiras. Este conjunto de arquivos foi elaborado a partir de dados horários, registrados em estações climatológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) entre os anos de 2000 e 2010. Os arquivos climáticos, em formato “EPW”, foram revisados em novembro de 2012, pelo grupo da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ANTAC), pelo Prof. Maurício Roriz, como parte dos estudos para a revisão do Zoneamento Bioclimático, previsto na NBR 15.220. Nota-se que para todas as zonas bioclimáticas brasileiras foram disponibilizadas diferentes opções de localidades representativas por zona (RORIZ, 2012).

### 2.1.2.3 Dia de projeto

O método de simulação selecionado utiliza o DDY para operação da edificação. O DDY determina o pico de carga para resfriamento ou aquecimento com base em um dia típico, que reflete as variações naturais de parâmetros meteorológicos e leva em consideração a dinâmica térmica da

edificação (HONG et al., 1999) (ASHRAE, 2009). Seguindo a metodologia da ASHRAE (2009), para avaliação do comportamento são definidos como dias extremos para cada cidade segundo o arquivo climático, um dia do mês de menor temperatura e um dia do mês de maior temperatura.

### **2.1.3 Caracterização das Condições Climáticas da Região Amazônica**

Na Região Amazônica Brasileira predomina o clima equatorial, com pluviosidade média anual de 2.500 mm e temperatura do ar mínima anual de 22 °C e máxima anual de 33 °C. Há uniformidade térmica e, normalmente, não se percebe a presença de variações sazonais no decorrer do ano. O clima é distribuído de maneira a caracterizar duas épocas distintas: seca e chuvosa. Uma das principais características do clima da Amazônia é a umidade relativa do ar, que pode ser bastante alta, podendo chegar a 100 % (saturação) no período da noite. Segundo PEEL *et al.* (2007) e ALVARES *et al.* (2013), Köppen classifica o clima da região como do tipo clima de monções (Am), ou seja, clima tropical chuvoso. As condições climáticas da zona tropical são divididas em vários climas. A cidade de Belém, especificamente, está localizada em clima Equatorial e é caracterizada pela alta umidade, alta pluviosidade, temperaturas quentes e baixas diferenças de temperatura diária. A Figura 2.2 mostra os estados que formam a Amazônia Legal Brasileira inseridos no mapa que indica o total diário médio da irradiação global horizontal, segundo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (INPE, 2017).

Assim, para o desenvolvimento deste trabalho são apresentadas as características climáticas de cada cidade. A Tabela 1.3 apresenta um resumo dos dados climáticos das capitais dos estados da Amazônia Legal. A Figura 2.3 mostra os valores das irradiâncias solares (global, direta e difusa) incidentes no plano horizontal e das temperaturas do ar externo para o dia típico, considerado como o dia mais quente do ano em cada capital dos estados, com base nos dados apresentados nos arquivos climáticos considerados para cada cidade (LABEEE, 2015).

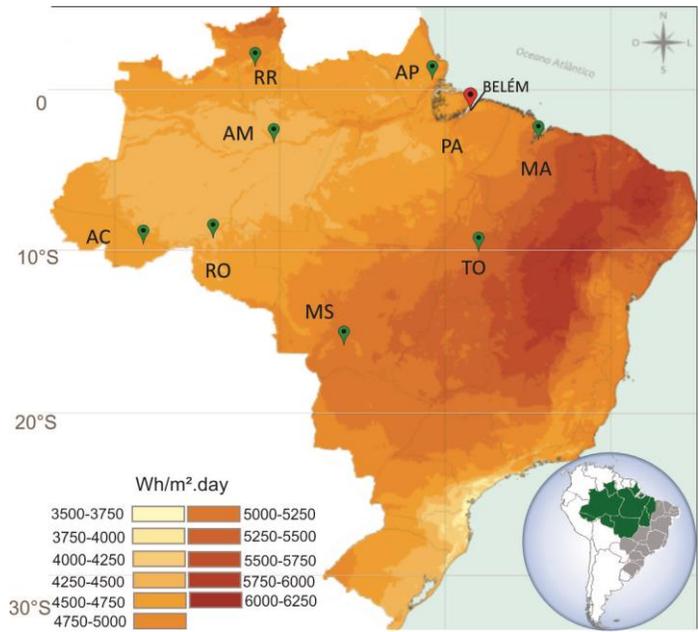


Figura 2.2. Mapa com irradiação global horizontal. Fonte: Adaptado de (INPE, 2017).

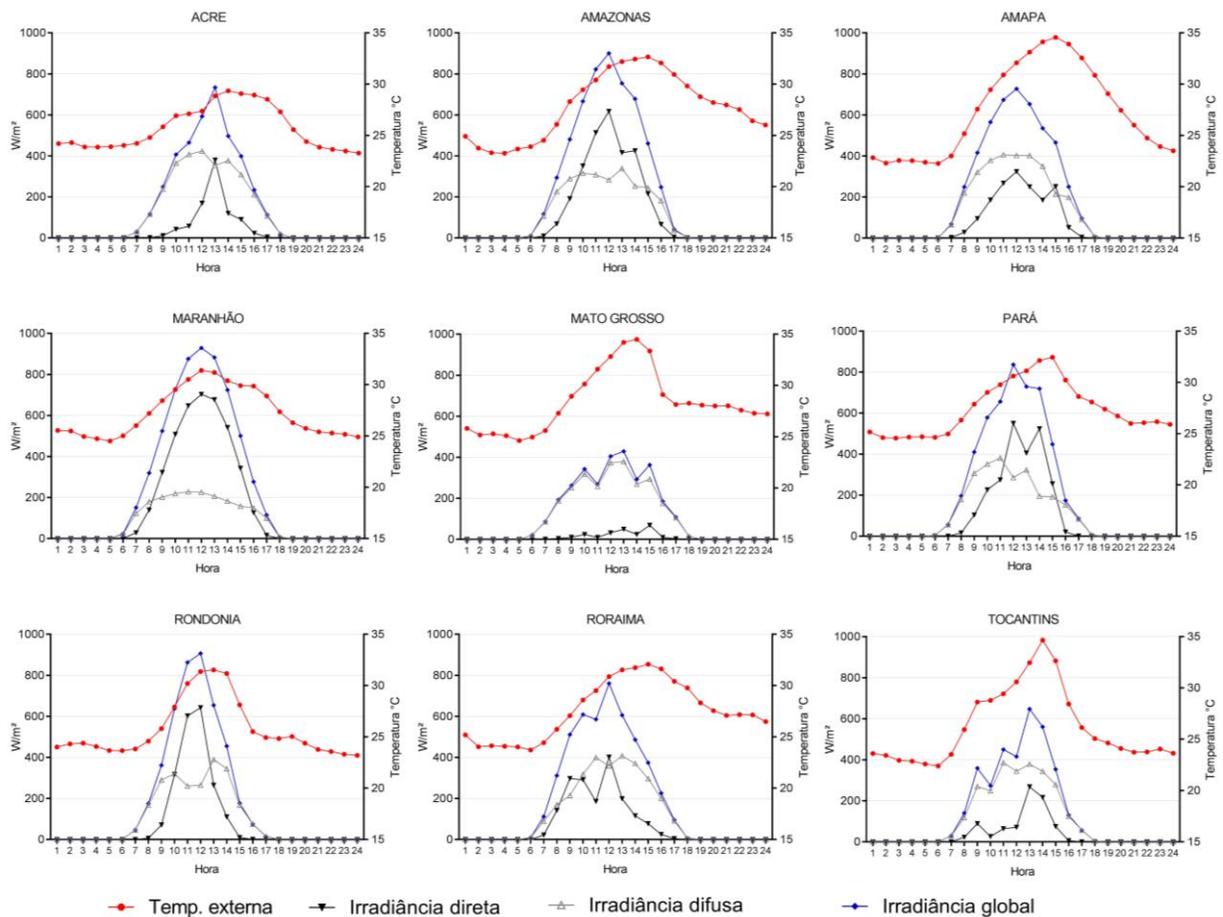


Figura 2.3. Condições climáticas para o dia considerado mais quente nas capitais. Fonte: Dados do LABEEE (2015).

Tabela 1.3. Dados climatológicos das cidades capitais. Fonte: Arquivo climático do (LABEEE, 2015).

Localidade	Período	Temperatura (°C)			Umidade (%)	Ventos Velocidade e Direção		Irradiação (kWh/m <sup>2</sup> )	Elevação (m)
		Média	Min.	Max.		(m/s)	(°)		
Belém	Anual	26,8	22,6	33,1	88	1,0	107	1.588	22
	21/02	26,2	23,5	31,3	92	0,9	111	4,26	
	21/11	27,6	23,4	33,1	93	1,6	119	5,81	
Rio Branco	Anual	25	11	36	83	1,4	177	1.634	220
Macapá	Anual	26	20	36	83	1,3	157	1.497	15
Manaus	Anual	28	21	37	80	1,4	159	1.721	92
São Luís	Anual	27	22	33	82	2,1	73	1.882	56
Cuiabá	Anual	26	10	40	71	2,0	178	1.842	151
Porto Velho	Anual	26	17	36	83	1,4	173	1.514	83
Boa Vista	Anual	27	21	36	76	1,5	129	1.648	76
Palmas	Anual	27	17	38	66	1,6	145	1.632	280

### 2.1.3.1 Clima de Belém-PA

A cidade de Belém, capital do estado do Pará, é considerada uma das capitais mais quentes e úmidas da região, influenciada diretamente pelo clima equatorial úmido ou tropical de floresta e pela proximidade à linha do Equador. Apresenta características climáticas especiais, devido à alta umidade, sempre com altas temperaturas associadas ao elevado potencial de radiação solar incidente, pouca variação térmica, associada com o regime das chuvas na região, visto que as temperaturas máximas menos acentuadas, com maior frequência, ocorrem por ocasião do período mais chuvoso, enquanto as mais elevadas coincidem com o período menos chuvoso. Caracteriza-se também por ventos com velocidade reduzida e constantes momentos de calmaria, altos índices de umidade relativa do ar, forte convecção, ar instável e alta umidade do ar, favorecendo a formação de nuvens convectivas e precipitações abundantes. A cidade de Belém não apresenta estações do ano bem definidas, destacando-se principalmente dois períodos, o de alta pluviosidade e o período considerado quente e “seco”.

A média anual da temperatura do ar é de 26,8 °C, registrando-se temperaturas máxima e mínima entre 33,1 °C e 22,6 °C, durante o ano, como mostra a Figura 2.4. A umidade relativa está acima do 70 % durante 65 % do total das horas do ano, sendo especialmente alta nos meses de fevereiro, março e abril, correspondentes aos meses de maior nebulosidade e precipitação pluviométrica. A Figura 2.4 ilustra também as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido em comparação com a faixa de conforto adaptativa mensal da ASHRAE 55/2010 (MILNE, 2017). Percebe-se que, considerando 90 % de aceitação dos usuários para a zona de conforto adaptativa,

as maiores temperaturas que ocorrem durante as 24 horas do dia, registradas para cada mês, estão sempre acima da zona de conforto. A temperatura operativa máxima na zona de conforto alcança os 28,9 °C, evidenciando o desconforto durante as horas do dia ao longo do ano.

A direção predominante do vento é nordeste, apresentando em 64 % das horas do ano direção entre 0° e 90° (leste). A velocidade do vento, encontra-se abaixo de 1 m/s durante 58 % das horas do ano. Em estudos realizados por BASTOS *et al.* (2002) a 2 m de altura, a velocidade do vento em Belém é baixa, e a média do período de 1989 a 1995 acusou valor anual de 1,5 m/s, com pequena variação entre os meses. Em medições registradas pela estação meteorológica instalada na área externa da edificação em estudo, durante o período de janeiro de 2011 a dezembro de 2016, a menor média horária de todos os anos registrou-se no mês de março (0,66 m/s) e a maior média horária no mês de novembro (3,31 m/s), que é um dos meses de menor pluviosidade. Os valores quando a média é menor que 1,3 m/s, ocorrem nos meses de maior pluviosidade (janeiro, fevereiro, março, abril e maio), enquanto que a maior média (valores acima de 1,6 m/s) ocorre nos meses de menor pluviosidade (setembro, outubro e novembro).

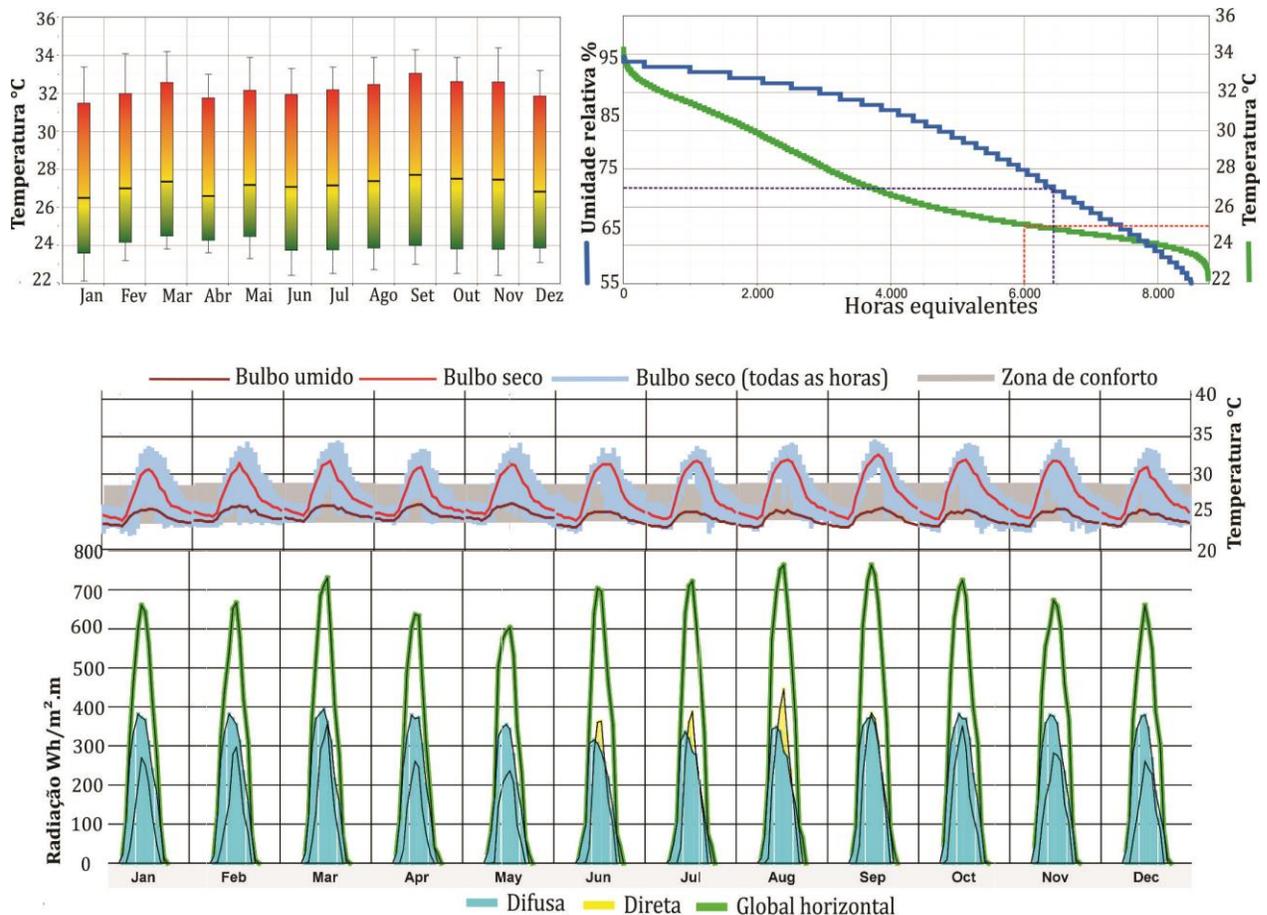


Figura 2.4. Características climáticas de Belém. Fonte: Adaptada de CLIMATE 6.0.

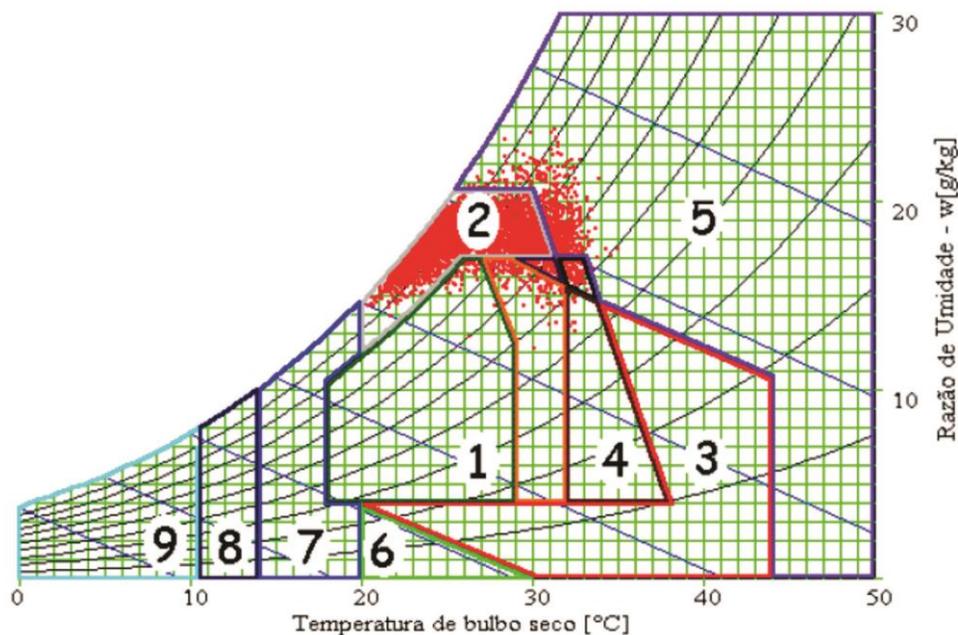
### 2.1.3.2 Clima das cidades amazônicas

As características resumidas das outras capitais são apresentadas no Apêndice.

### 2.1.4 Características construtivas

Na zona bioclimática 8, onde se encontra a cidade de Belém, as principais estratégias são determinadas com base no clima predominante, quente e úmido, sendo as mais importantes: aberturas para ventilação e sombreamento das aberturas, parede leve refletora, e cobertura leve refletora (ABNT, 2005). Esta zona bioclimática ressalta a cultura construtiva da Região Amazônica, como a utilização de estratégias de condicionamento térmico passivo, como ventilação cruzada permanente, ressaltando que este geralmente não é suficiente durante os períodos do dia com altas temperaturas.

Segundo a carta bioclimática para a cidade de Belém, mostrada na Figura 2.5, a principal estratégia é a ventilação natural. Porém, nota-se que na zona de ar-condicionado existe a necessidade de condicionamento ativo para obtenção de conforto.



1 – Zonas de conforto; 2 – Ventilação; 3 – Resfriamento Evaporativo; 4 – Massa térmica para resfriamento; 5 – Ar-condicionado; 6 – Umidificação; 7 – Massa térmica e Aquecimento solar passivo; 8 – Aquecimento solar passivo; 9 – Aquecimento artificial.

Figura 2.5. Carta bioclimática para a cidade de Belém. Fonte: AGUILAR (2004).

Para atender essas condições na cidade de Belém, desde a década de 1980 encontram-se soluções construtivas, direcionadas principalmente a edificações habitacionais, que reforçavam o alinhamento de um projeto moderno com as especificidades climáticas locais: madeiras da região nas estruturas das construções; janelas venezianas com palhetas móveis; beirais de proteção contra a insolação direta e as chuvas constantes; e planos de elementos vazados nas fachadas, permitindo a circulação de ar cruzada e o controle da incidência solar nas fachadas (SOUZA, 2002), (SARQUIS, 2011), (SAMPAIO, 2013).

As construções inseridas no contexto da instituição educativa (UFPA), também na década de 1980, têm características que mostram a tradição modernista associada a oferecer qualidade e conforto aos alunos. A Figura 2.6, por exemplo, mostra projetos de arquitetura adaptados ao clima amazônico, que seriam resultado de uma preocupação ambiental e de conforto.



Figura 2.6. Ateliê de Arquitetura e Restaurante Universitário. Fonte: SARQUIS (2011).

Na atualidade, a instituição universitária atravessa uma etapa de adensamento construtivo, onde as construções apresentam, geralmente, geometria retangular, pequenas janelas com caixilhos em alumínio, com notável deficiência em iluminação natural, e os sistemas de condicionamento de ar são dimensionados para retirada das cargas térmicas, independentemente dos materiais usados.

## 2.2 CARACTERIZAÇÃO DA EDIFICAÇÃO

A edificação está localizada no Campus da Universidade Federal do Pará, na cidade de Belém-PA e é a sede do Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas (GEDAE). O Laboratório é um edifício institucional de caráter acadêmico, que tem como função servir de laboratório para estudos e práticas sobre desenvolvimento de alternativas energéticas, geração de energia a partir de fontes renováveis, atividades de pesquisa de estudantes, professores, profissionais e empresas da Região.

## 2.2.1 Geometria

De formas retangulares unidas por uma forma circular, a edificação apresenta espaços anexos a um corredor como eixo principal de circulação e iluminação. Esses espaços, individualmente, possuem um sistema de condicionamento de ar, para uso durante o período diurno, onde é necessário o uso de sistemas ativos para refrigeração, devido aos longos períodos de calmaria durante o dia, chegando até 58 % das horas do ano, e baixa velocidade do vento no local, fatores que impossibilitam oferecer condições de conforto com ventilação natural, como especifica a carta bioclimática.

Para efeitos de análise, cada espaço é denominado zona térmica, por possuir sistema de climatização com controle único, como especificado pelo INMETRO (MDIC, 2012a): “zona térmica como espaço ou grupo de espaços dentro de uma edificação condicionada que são suficientemente similares, onde as condições desejadas (temperatura) podem ser controladas usando um único sensor (termostato ou sensor de temperatura)”. A edificação possui 30 zonas térmicas em um área total de 1.408,17 m<sup>2</sup>, dividida em duas etapas construtivas.

### 2.2.1.1 Implantação da edificação

O projeto da edificação em estudo foi desenvolvido como trabalho de pesquisa de uma dissertação de mestrado na UFPA (AGUILAR, 2004). O prédio foi concebido como projeto de uma edificação energeticamente autônoma e eficiente, utilizando sistemas de energia solar passiva, mediante a aplicação de técnicas bioclimáticas, aproveitando ao máximo a iluminação e a ventilação naturais, sempre que possível, apoiada por materiais de construção adequados (AGUILAR, 2004). A Figura 2.7 apresenta uma vista em perspectiva do volume da edificação projetada.

Após a concepção e aprovação do projeto, procedeu-se à sua execução no campus principal da instituição universitária. Entretanto, pela escassez de recursos para a construção da obra na sua totalidade, optou-se pela divisão em duas etapas: construção de uma área de 904,39 m<sup>2</sup>, já construída e em uso desde o ano de 2010, e uma área projetada de 503,78 m<sup>2</sup>, que será construída mediante disponibilidade de recursos. Os materiais, sistemas e equipamentos descritos e analisados compreendem o estudo do projeto como um todo, com exceção do processo de validação apresentado posteriormente.



Figura 2.7. Perspectiva do modelo da edificação.

### Área construída

A área construída do edifício é de 904,39 m<sup>2</sup>. O prédio é formado por 16 zonas térmicas, e um espaço de circulação. A Figura 2.8 mostra a planta baixa da área construída, com divisão das zonas Z01 até Z16 e corredores, e a Tabela 2.1 apresenta as zonas térmicas que compõem esta área e suas características.

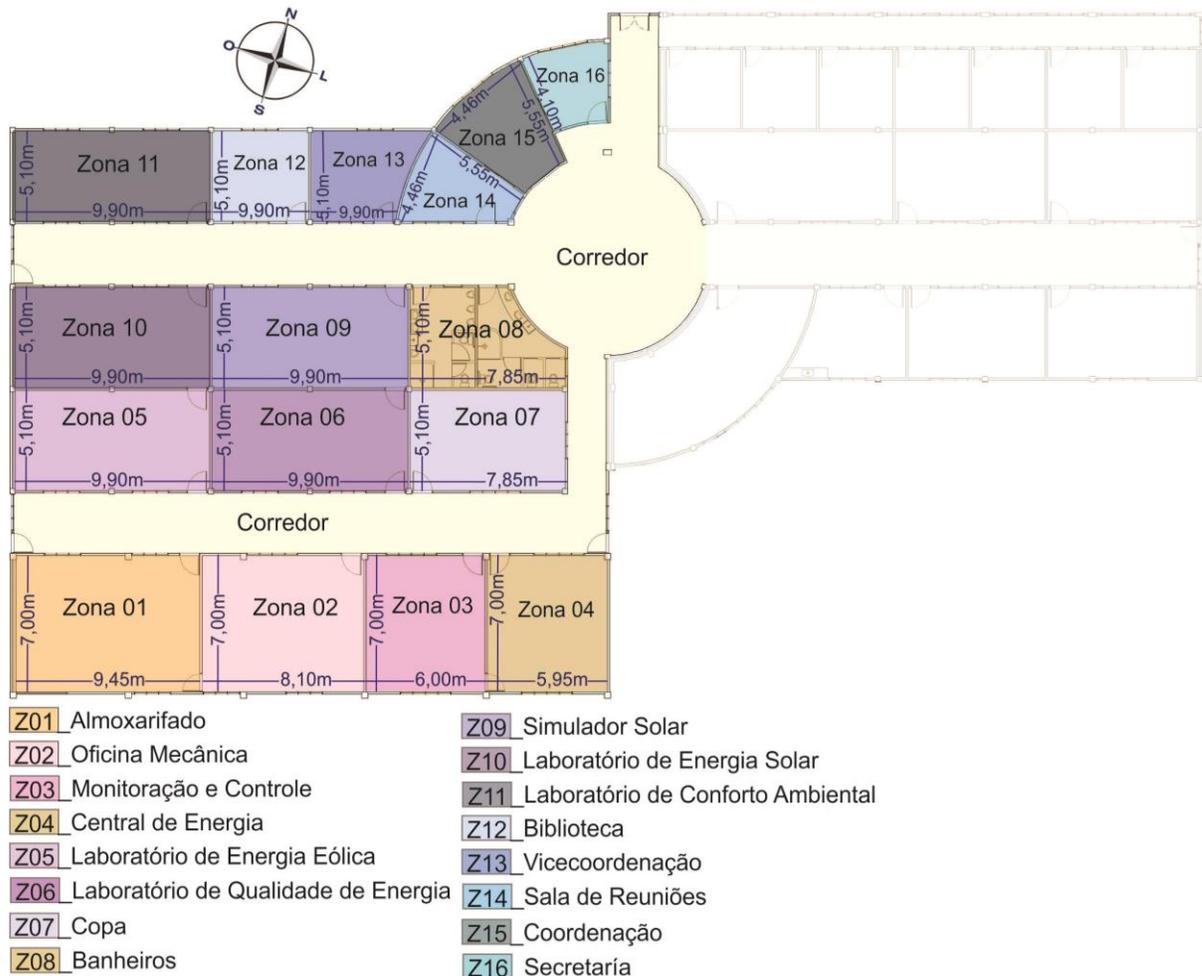


Figura 2.8. Zonas térmicas da área construída da edificação.

Tabela 2.1. Zonas térmicas da área construída e suas características.

	<b>Espaço</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Volume (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Orientação (parede externa)</b>	<b>HVAC</b>
01	Almoxarifado	66,15	259,21	Sul/Oeste	Não
02	Oficina Mecânica	56,70	222,18	Sul	Sim
03	Monitoração e Controle	42,00	164,58	Sul	Sim
04	Central de Energia	41,65	163,21	Sul/Leste	Não*
05	Laboratório de Energia Eólica	50,49	138,5		Sim
06	Laboratório de Qualidade de Energia	50,49	138,5		Sim
07	Copa**	40,03	151,31		Sim
08	Banheiros	35,66	138,19		Não
09	Simulador Solar***	50,49	244,55		Sim
10	Lab. de Energia Solar	50,49	244,55		Sim
11	Lab. de Conforto Ambiental	47,52	156,82	Norte/Oeste	Sim
12	Biblioteca	23,52	77,62	Norte	Sim
13	Vice coordenação	24,60	81,18	Norte	Sim
14	Sala de Reuniões	18,56	63,38		Sim
15	Coordenação	21,91	75,42	Norte	Sim
16	Secretaria	13,99	46,63	Norte	Sim
	Corredores	270,14			Não
<b>Área total construída</b>		<b>904,39</b>			

\*O aparelho para condicionamento de ar desta zona foi instalado após as medições.

\*\* Instalação provisória na área projetada para a Oficina Eletrônica.

\*\*\* Instalado na área originalmente destinada ao Laboratório de Eficiência Energética, que atualmente divide espaço com o Laboratório de Qualidade de Energia.

### Área projetada

A área projetada corresponde a espaços de apoio para os laboratórios, como salas de professores, auditório e atendimento de alunos. O projeto é composto por 14 zonas térmicas e corredores de circulação, que ocupam uma área de 503,78 m<sup>2</sup>, e que para efeitos deste estudo são denominadas zonas térmicas de Z17 até Z30. A Figura 2.9 mostra os espaços que compõem a área em projeto e a Tabela 2.2 apresenta as características das zonas térmicas Z17 a Z30, que compõem a área em projeto.

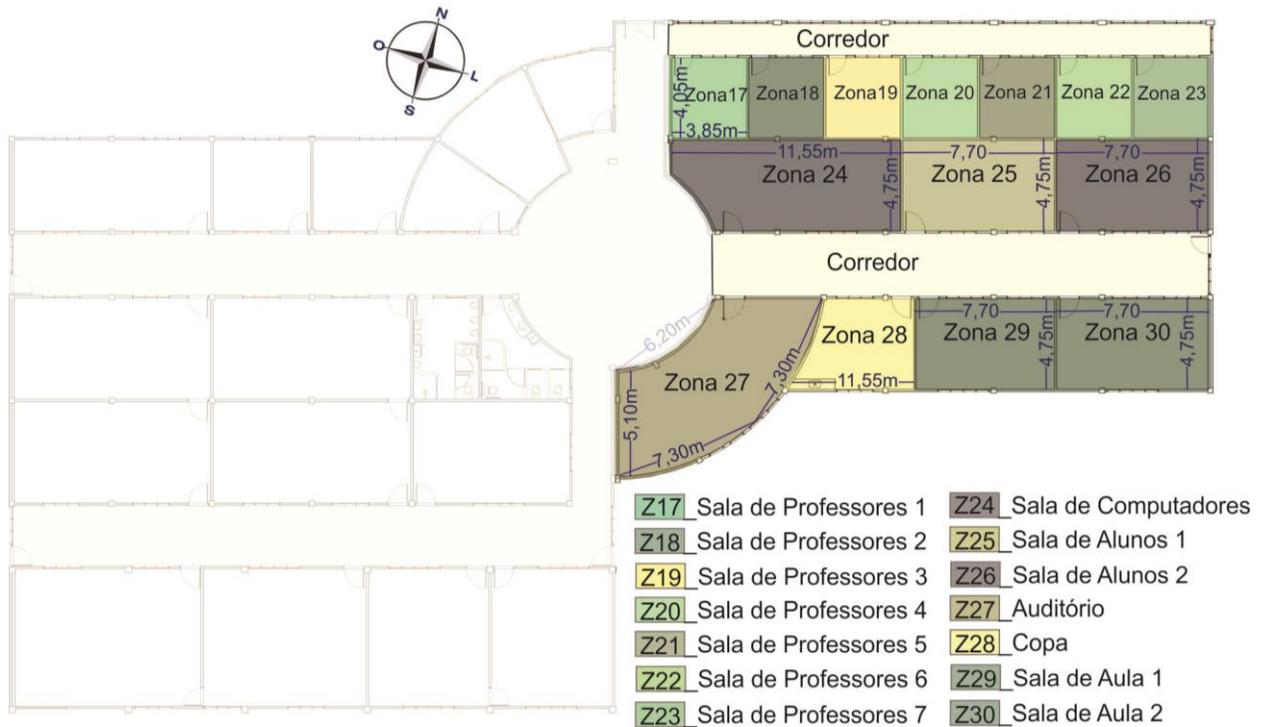


Figura 2.9. Zonas térmicas da área em projeto da edificação.

Tabela 2.2. Zonas térmicas da área em projeto e suas características.

	<b>Espaço</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Volume (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Orientação (parede externa)</b>	<b>HVAC</b>
17	Sala de Professor 1	15,59	72,78	Norte	Sim
18	Sala de Professor 2	15,59	62,67	Norte	Sim
19	Sala de Professor 3	15,59	62,67	Norte	Sim
20	Sala de Professor 4	15,59	62,67	Norte	Sim
21	Sala de Professor 5	15,59	62,67	Norte	Sim
22	Sala de Professor 6	15,59	62,67	Norte	Sim
23	Sala de Professor 7	15,59	62,67	Norte	Sim
24	Salas de Computadores	51,70	196,11		Sim
25	Sala de Alunos 1	36,58	138,99		Sim
26	Salas de Alunos 2	36,58	138,99	Leste	Sim
27	Auditório	57,04	195,89	Sul	Sim
28	Copa	24,63	81,26		Sim
29	Sala de Aulas 1	32,34	106,72	Sul	Sim
30	Salas de Aulas 2	35,88	118,41	Sul/Leste	Sim
	Corredores	119,89			Não
	<b>Área total em projeto</b>	<b>503,78</b>			

## 2.2.2 Orientação

A fachada principal é direcionada com inclinação de  $-19^\circ$  no eixo leste-oeste, respondendo às características urbanísticas da zona e alinhado à via de acesso principal. Esta orientação restringe a área de exposição das fachadas que recebem sol de ângulo baixo (nascente e poente) e permite o sombreamento da fachada que mais recebe sol de ângulo alto (norte), beneficiando-se ainda de iluminação natural. A Figura 2.10 mostra o percurso solar com relação à edificação e a influência dos ventos, assim como a orientação de  $-19^\circ$  com relação ao norte geográfico e a Figura 2.11 mostra a fotografia da fachada norte (principal).

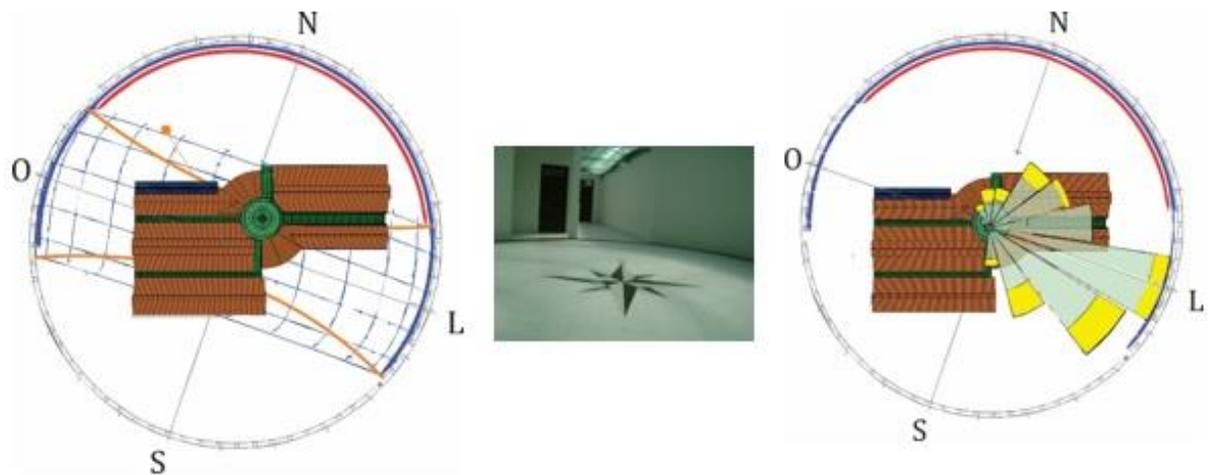


Figura 2.10. Orientação do edifício (planta) e a influência dos ventos.



Figura 2.11. Fachada norte da edificação.

## 2.2.3 Materiais Construtivos

Determinadas as zonas térmicas e as superfícies que transferem e/ou armazenam calor, são especificados os detalhes construtivos (paredes, janelas, portas, etc.) e os materiais com suas

características termo-físicas. As propriedades dos materiais, dependendo da orientação e da exposição solar, determinam a capacidade que a edificação tem para dissipar a radiação solar e as cargas térmicas absorvidas na sua estrutura, determinante em grande parte do grau de conforto oferecido aos ocupantes e os consequentes gastos com energia para climatização. Os componentes são especificados a seguir.

**Pisos.** Formado por um laje mista, com complemento em poliestireno expandido EPS (Isopor®), sendo que nas áreas de serviço e laboratórios recebe uma camada tipo argamassado, de grande densidade e elevada resistência a impactos frequentes e à abrasão (Korodur), e lajota cerâmica em espaços sociais e administrativos.

**Paredes.** As paredes externas e internas são compostas por tijolos cerâmicos de seis furos e argamassa, com pintura na cor branco-neve e espessura total de 0,14 m. As superfícies verticais dos lados oeste e leste, são compostas por duas camadas de tijolo e um painel de lã de vidro, com espessura total de 0,25 m. A constituição das paredes está especificada na Figura 2.12.

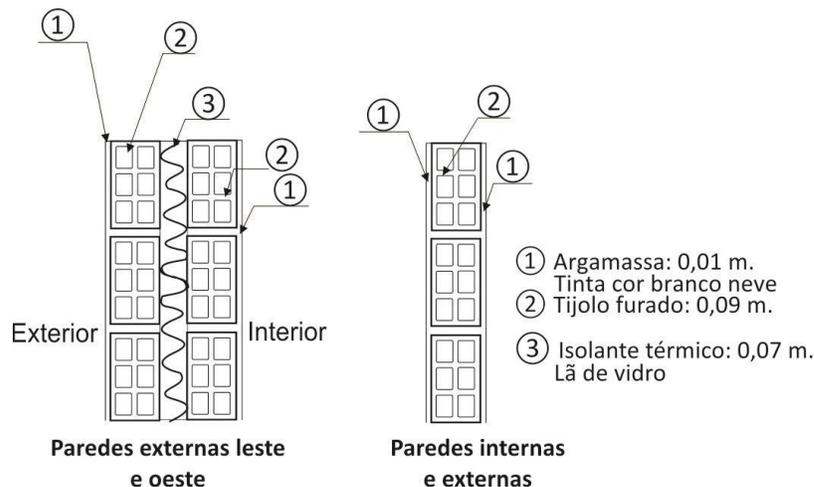


Figura 2.12. Composição das paredes.

**Coberturas.** A cobertura é composta por telha de barro, manta térmica de lã de vidro sobre estrutura de madeira, seguida, em ordem descendente, por uma câmara de ar e forro em lâmina de PVC. A cobertura norte apresenta sistemas fotovoltaicos integrados ao beiral e adaptados acompanhando a inclinação, como mostra a Figura 2.13, onde são especificados também os componentes.

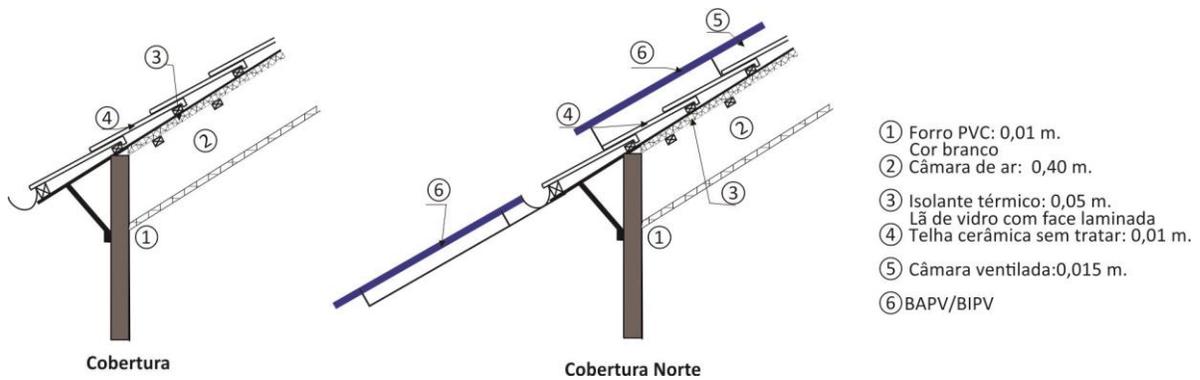


Figura 2.13. Composição das coberturas.

**Iluminação Zenital.** O edifício possui iluminação zenital tipo *skylight*, sobre os corredores de circulação e o espaço central, como áreas de permanência transitória, formada por chapas de policarbonato alveolar (com cavidade interna entre duas paredes externas) de 6 mm, na cor verde e com camada refletiva na face externa, instalada sobre uma estrutura metálica.

O policarbonato fornece uma considerável taxa de transmissão luminosa (59 %) e aumenta a reflexão da luminosidade externa, reduzindo o índice de transmissão de calor de até 7 °C (REPLAEX, 2017). Este material apresenta valores consideráveis de isolamento térmico gerado pelo colchão de ar formado entre as paredes das chapas (alvéolos), facilitando assim a troca de energia entre o meio interno e o externo, dificultando a entrada de calor no ambiente e mantendo a temperatura interna. A Figura 2.14 mostra a área coberta pelo policarbonato, que apresenta uma relação abertura zenital/telhado (SRR - *Skylight-Roof Ratio*) de 12,05 % da cobertura total, e fornece uma alta contribuição de iluminação natural nas áreas de circulação que comunicam os diferentes ambientes. As propriedades do policarbonato estão especificadas na Tabela 2.3.

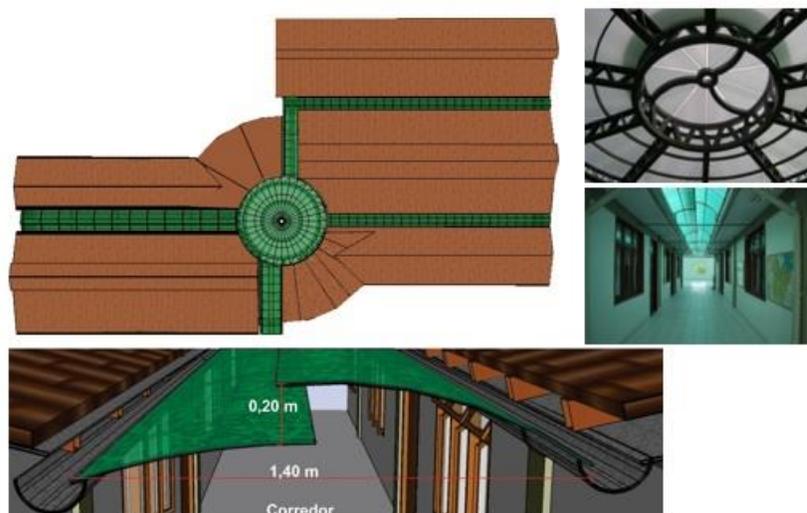


Figura 2.14. Cobertura da edificação, com detalhes da iluminação zenital em destaque.

**Aberturas.** As aberturas são caracterizadas por serem de grandes dimensões, com caixilhos em madeira, e vidro comum de 4 mm de espessura, com abas pivotantes e de aberturas consideráveis, para facilitar a ventilação natural, sempre que possível. Acredita-se que a possibilidade de ter a escolha de abrir uma janela proporciona uma sensação de conforto. Possuem balancins superiores para maior aproveitamento da iluminação natural. A Figura 2.15 apresenta uma janela típica da edificação, e as características termo-físicas do vidro são apresentadas na Tabela 2.3.



Figura 2.15. Janelas típicas da edificação.

As propriedades dos materiais e as características construtivas das paredes, do piso, da cobertura e das aberturas, conforme constam na Tabela 2.3 e Tabela 2.4, são obtidas da norma NBR 15220 (ABNT, 2005) e inseridas no modelo para simulação.

Tabela 2.3. Características dos materiais translúcidos e transparentes.

	<b>Espessura (mm)</b>	<b>Transmitância solar</b>	<b>Refletância visível - solar</b>		<b>Emissividade</b>	<b>Condutância (W/m.K)</b>
Vidro	4	0,837	0,081	0,075	0,84	0,917
Polycarbonato	6	0,4	0,534	0,054	0,84	0,19

Tabela 2.4. Propriedades dos componentes do envelope.

	<b>Piso Cerâmico</b>	<b>Laje Mista</b>	<b>Reboco</b>	<b>Bloco Cerâmico int.</b>	<b>Bloco Cerâmico ext.</b>	<b>Telha cerâmica</b>
Espessura (m)	0,01	0,25	0,025	0,007	0,012	0,01
Condutividade (W/(mK))	0,9	0,313	1,15	0,9	0,9	1,05
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	1.600	790	2.000	1.600	1.600	2.000
Calor específico (J/kg-K)	920	920	1.000	920	920	920
Absortância	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Absortância solar	0,6	0,93	0,2	0,7	0,7	0,65

## 2.2.4 Cargas externas

### 2.2.4.1 Temperaturas do solo

A edificação possui grandes superfícies em contato direto com o solo. Para simular a influência que o solo exerce nas temperaturas da edificação e vice-versa, utiliza-se o *programa* auxiliar “pré-processador *Slab*”. O *Slab* é uma ferramenta que calcula a transferência de calor da temperatura superficial do solo para o piso da edificação. O resultado deste cálculo são as temperaturas do solo em contato com a edificação para cada mês do ano. Esta ferramenta está disponível na interface do EnergyPlus (2016a).

### 2.2.4.2 Radiação

Para os cálculos do comportamento térmico da edificação, são analisadas quais superfícies recebem a maior quantidade de radiação solar. Os níveis de irradiação ( $\text{Wh/m}^2$ ) recebidos pelas superfícies externas são altos, como pode ser visto na Figura 2.16, que mostra a média mensal de irradiação recebida pelas superfícies externas da Z11, que se encontra localizada no extremo noroeste da edificação e possui paredes para o norte e o oeste, superfícies que, junto com a cobertura, recebem radiação solar durante os horários mais quentes do ano.

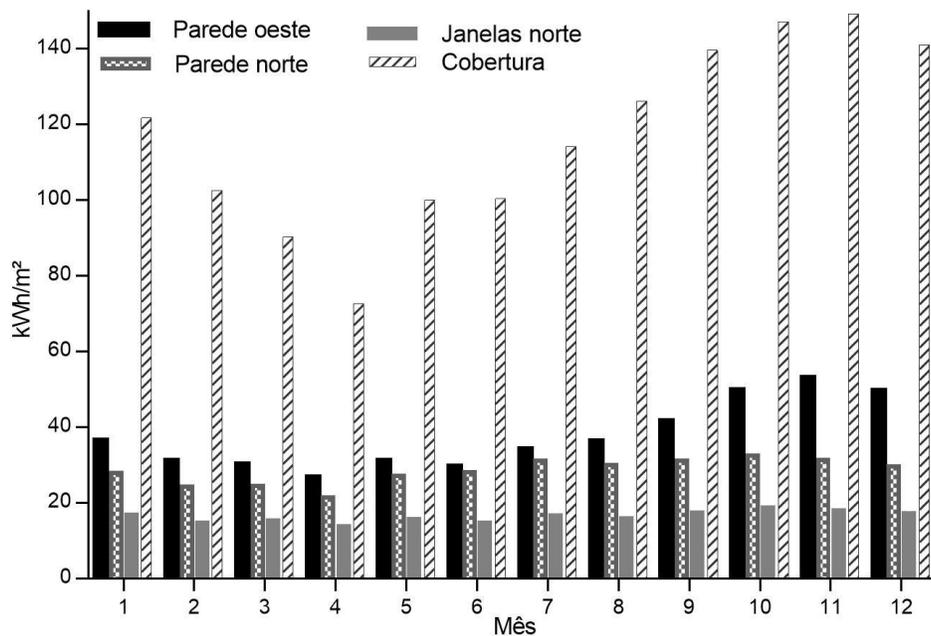


Figura 2.16. Níveis de irradiação nas superfícies da Z11.

### 2.2.4.3 Infiltração

A infiltração é também conhecida como vazamento de ar no interior de uma edificação. As infiltrações são geralmente causadas pela abertura e fechamento voluntários de portas, frestas em aberturas, e particularidades da construção (ENERGYPLUS, 2013). Os caixilhos, as portas e as esquadrias em geral são em madeira e, pelas características geométricas (largas e altas), podem apresentar frestas que facilitam a infiltração de ar. A quantidade máxima de infiltração esperada é declarada em  $\text{m}^3/\text{s}$  por zona. Para este trabalho é considerada a infiltração de uma troca do volume do ambiente por hora em cada zona, valor recomendado pela ASHRAE (2009).

## 2.2.5 Cargas Internas

### 2.2.5.1 Ocupação

A ocupação humana tem uma contribuição importante para a carga térmica interna da edificação, medida a partir da taxa metabólica de cada ocupante (W), dependendo do sexo, idade e função desempenhada durante a sua presença na edificação. Como não é possível determinar com exatidão a contribuição de cada ocupante, uma vez que não se pode prever o tipo de atividade que cada um irá exercer e que ocupantes estarão ausentes, considerou-se os níveis de atividade especificados na ASHRAE 55 (ENERGYPLUS, 2013).

#### Rotinas de ocupação

As rotinas de uso do edifício estão associadas ao funcionamento de uma instituição educativa. Supõe-se uma ocupação de segunda a sexta-feira, entre 07h00 e 20h00. Os dias feriados são baseados no calendário oficial brasileiro (DOU, 2015), excluindo datas locais, por ser tratar da análise em várias cidades. As cargas térmicas por ocupação inseridas para cada zona no projeto, são valores referenciados, que correspondem a uma média de atividades realizadas em laboratórios de pesquisa. Estes dados permitem calcular o perfil de ocupação real, constando para cada sala: o número de ocupantes, a correspondente carga térmica absoluta e por unidade de área, os horários de início e fim de ocupação e o número total de horas de permanência no espaço. O perfil de ocupação de um dia típico é mostrado na Figura 2.17.

### 2.2.5.2 Iluminação artificial

A iluminação durante o dia é predominantemente natural, fornecida pelas aberturas verticais e pela abertura zenital (*skylight*). Os sistemas de iluminação artificial possuem controle manual, sendo ativados pelo usuário quando necessário, dependendo das condições de iluminação natural

prevalentes. O perfil de uso de iluminação artificial obtido a partir dos dados das medições é mostrado na Figura 2.17, onde se percebe que durante o dia a iluminação é usada abaixo de 30 % da potência instalada. A iluminação artificial a partir das 21h00 e nos finais de semana bem como a iluminação externa são usadas especificamente para segurança, e os consumos registrados são desprezados, por apresentarem valores muito baixos, que não influem nos cálculos.

Atualmente os espaços são equipados com luminárias com lâmpadas fluorescentes de 2 x 28 W com reator eletrônico, alinhadas paralelamente às janelas. São do tipo de fluxo descendente com difusores e aleta espelhada, sobrepostas no forro, e apresentam valores de fração de ar de retorno de 0,0; fração radiante de 0,27; visível de 0,23; e fração de calor por convecção de 18, com base na ASHRAE 1282-RP (ASHRAE, 2009). Considera-se que a iluminação artificial permanece desligada durante feriados e finais de semana. A Figura 2.18 mostra a instalação das luminárias no forro.

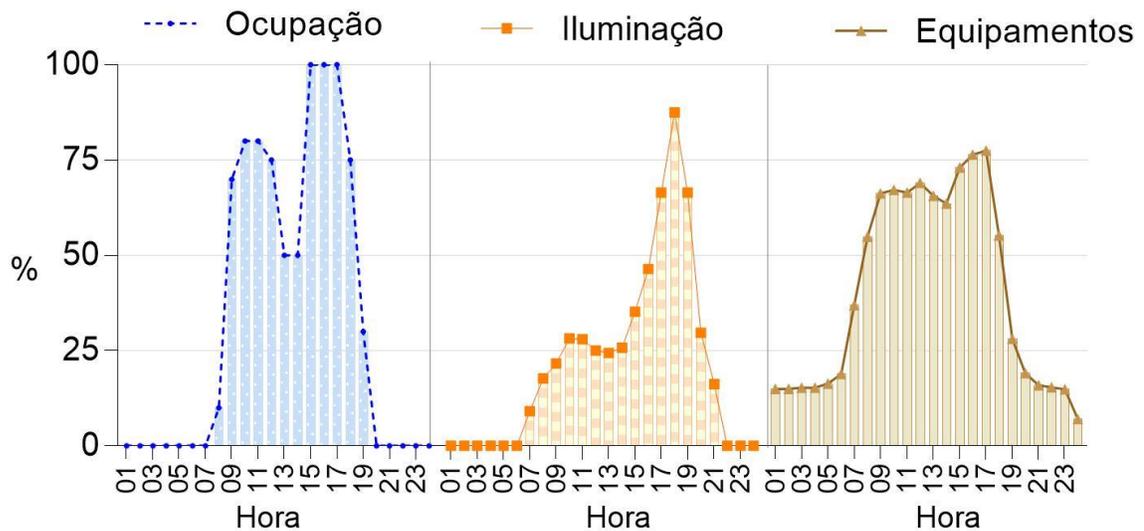


Figura 2.17. Perfis de uso da edificação. Fonte: Medições *in loco*.



Figura 2.18. Instalação das luminárias.

### 2.2.5.3 Equipamentos

Em uma edificação com as características do caso em estudo, o consumo de energia em equipamentos tem uma parcela representativa. Para este caso específico, são utilizados valores presentes nas tabelas divulgadas pelo PROCEL (ELETROBRÁS, 2014), referentes às potências eléctricas dos equipamentos instalados, onde as horas de utilização de cada aparelho estão distribuídas ao longo do horário de ocupação do prédio, dependendo das necessidades. O perfil de uso de equipamentos em um dia típico é mostrado na Figura 2.17.

### 2.2.5.4 Condicionamento de ar

Pelas características climáticas da Região Amazônica, é indispensável o uso de sistemas artificiais de climatização do ar. Na edificação em estudo, cada zona é equipada com unidades individuais de expansão direta tipo *Split* de ciclo frio, com controle manual pelo usuário e para cada ambiente com temperatura de termostato ajustada a 25 °C.

A edificação caracteriza-se por ter um perfil com alto consumo em condicionamento de ar, como ocorre praticamente em toda a Região. Segundo a Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Consumo (ELETROBRÁS, 2007), os sistemas individuais de parede e/ou *split* foram os mais encontrados nas instituições de ensino, chegando próximo a 94 %. As especificações dos sistemas de condicionamento de ar, bem como as características dos aparelhos de expansão direta tipo *Split* estão apresentadas na Tabela 2.5.

## 2.3 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

A Região Amazônica, e em particular a cidade de Belém, por estarem localizadas próximo à linha do Equador, possuem um clima com temperatura e umidade altas, que requer especial atenção nas suas edificações. Fornecer um adequado conforto aos usuários e fazer uso racional da energia eléctrica converte-se em um grande desafio. O Laboratório de Eficiência Energética e Energias Renováveis caracteriza-se como uma edificação eficiente, tanto pelos materiais utilizados quanto pelos seus sistemas (AGUILAR, 2004).

A Tabela 2.6 mostra um resumo das características do modelo e os dados básicos necessários para as próximas etapas desta análise.

Tabela 2.5. Especificações dos sistemas de condicionamento de ar.

	Capacidade máxima (W)	Coefficiente de Desempenho - COP (W/W)	Índice de Eficiência de Energia - EER (BTU/Wh)	Capacidade demandada (BTU/h)	Capacidade instalada (BTU/h)
02-Oficina Mecânica	8.119	2,52	8,58	27.704	24.000
03-Monitoração e controle	6.425	2,66	9,08	21.922	24.000
05-Laboratório de energia eólica	7.664	2,52*	8,58	22.739	24.000
06-Laboratório de qualidade de energia	6.799	2,66	9,08	23.199	24.000
07-Copa	7.420	2,52	8,58	25.317	24.000
09-Simulador solar	6.620	2,66	9,08	22.589	24.000
10-Laboratório de energia solar	6.656	2,66	9,08	22.712	36.000
11-Laboratório de conforto ambiental	6.173	2,68	9,15	21.064	24.000
12-Biblioteca	2.970	2,52	8,58	10.134	9.000
13-Vice-ccordenação	3.301	2,52	8,58	11.262	9.000
14-Reunião	3.660	2,52	8,58	12.489	9.000
15-Coordenação	2.915	2,52	8,58	9.948	24.000
16-Secretaria	3.155	2,52	8,58	10.756	9.000
17-Sala de professor 1	3.303	2,7	9,2	11.270	
18-Sala de professor 2	2.775	2,7	9,2	9.470	
19-Sala de professor 3	2.719	2,7	9,2	9.279	
20-Sala de professor 4	2.771	2,7	9,2	9.453	
21-Sala de professor 5	2.772	2,7	9,2	9.457	
22-Sala de professor 6	2.744	2,7	9,2	9.363	
23-Sala de professor 7	2.687	2,7	9,2	9.170	
24-Sala de computadores	7.614	2,8	9,54	25.981	
25-Sala de alunos 1	5.706	2,7	9,2	19.470	
26-Sala de alunos 2	5.274	2,7	9,2	17.996	
27-Auditório	8.499	2,84	9,7	28.999	
28-Copa	4.305	2,71	9,25	14.690	
29-Sala de aula 1	5.433	2,68	9,15	18.539	
30-Sala de aula 2	5.729	2,68	9,15	19.548	

\* Aparelho trocado após as medições.

Tabela 2.6. Resumo dos componentes de fluxo de calor analisados.

<b>Componentes do fluxo de calor</b>	<b>Unidade</b>	
Paredes externas	m <sup>2</sup>	718,22
Transmitância – Parede sem isolante / Parede com isolante	W/m <sup>2</sup> K	1,84 / 0,30
Janelas	m <sup>2</sup>	160,26
WWR	%	22,31
Espessura do vidro	mm	4
Transmissividade + Absortância do vidro	(Ts+Abs)	0,862
Proteção solar externa		beiral
Cobertura	m <sup>2</sup>	1.469,98
Transmitância térmica da cobertura	W/m <sup>2</sup> K	0,349
Iluminação zenital ( <i>Skylight</i> )	m <sup>2</sup>	206,19
SRR	%	14,03
Transmissividade do policarbonato (SHGC)	Ts	0,215
Piso	m <sup>2</sup>	1.408,17
Transmitância - piso cerâmica / piso cimentício	W/m <sup>2</sup> K	1,20 / 1,87
Equipamentos	W/m <sup>2</sup>	15,23
Iluminação	W/m <sup>2</sup>	6,39
Ocupação	m <sup>2</sup> /pessoa	9,08
Taxa metabólica	W	117
Infiltração	m <sup>3</sup> /hora	1

## **3 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA EDIFICAÇÃO - MEDIDAS DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA**

Neste capítulo é realizada uma avaliação da edificação em duas partes: uma análise dinâmica mediante o método de simulação da edificação e os sistemas instalados; e uma análise estática do modelo real da edificação, segundo a regulamentação vigente, após a determinação do impacto de medidas de conservação de energia aplicadas.

Para avaliar a eficiência energética da edificação em estudo, são utilizadas ferramentas de simulação (EnergyPlus e Daysim). Os resultados são comparados com dados medidos *in loco*, para validação dos dados e verificação da confiabilidade do modelo. Posteriormente é realizada a avaliação do nível de eficiência energética pelo método prescritivo do RTQ-C, por meio de planilhas e equações especificadas pelo regulamento. Finalmente são descritos os sistemas de geração fotovoltaica instalados e sua contribuição.

### **3.1 ANÁLISE DINÂMICA**

O processo de análise dinâmica é auxiliado pelo uso de programas computacionais de simulação do comportamento térmico-energético e de sistemas de iluminação natural e artificial. Uma adequada escolha dos programas usados e, conseqüentemente, dos parâmetros determinados para entrada de dados e o entendimento dos dados de saída obtidos pela simulação são critérios fundamentais para a compreensão geral do modelo utilizado. O modelo computacional deve incluir as características da envoltória da edificação, o arquivo climático de acordo com a zona bioclimática onde se encontra localizado, os sistemas de condicionamento de ar, ventilação natural, se necessária, sistemas de iluminação, etc. Esta fase do processo pressupõe a existência prévia de um levantamento de campo da envoltente, iluminação, equipamentos, sistemas de climatização de ar, ocupação, horários de funcionamento e eficiências de equipamentos de climatização, dentre outros.

Com as características dos programas já exploradas, utiliza-se então o programa EnergyPlus (2016b) para simulações térmica e energética, e para avaliação da contribuição de iluminação natural é usado o DAYSIM/RADIANCE (REINHART., 2015).

O processo de simulação pode ser simplificado nos seguintes passos: com os dados de projeto e das cargas térmicas avalia-se o desempenho da edificação; conhecendo as necessidades de energia, são inseridos ou selecionados os modelos de simulação dos sistemas e instalações HVAC; verificado o desempenho e feitas as correspondentes alterações, são calculados o consumo de energia, taxas de saída e utilização da energia e, finalmente, os cálculos de custos.

### 3.1.1 Validação e Calibração

#### 3.1.1.1 Índices de erro

Uma avaliação básica da exatidão de um modelo consiste no cálculo de índices de erro. Em 2014, a ASHRAE lançou o *Guideline Measurement of Energy, Demand and Water Savings*, que recomenda a utilização de índices estatísticos como critérios para avaliação da exatidão de um modelo de calibração. Este critério não consiste em uma metodologia em si, mas sim em uma medida de quão boa é a calibração feita no modelo. Existem inúmeros índices, sendo que os mais usados para avaliação da exatidão de modelos de previsão encontram-se formulados nas Equações 3.1 a 3.4 (PEDRO; COIMBRA, 2012).

O *Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error* (CV(RMSE)) mede a diferença entre os valores obtidos pela simulação de um modelo e os valores obtidos por monitoramento. Valores baixos de CV(RMSE) indicam menor variância dos dados e melhor qualidade.

**Root Mean Square Error** (RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{t=1}^m (P_t - \hat{P}_t)^2} \quad (3.1)$$

A versão normalizada é chamada de *normalized Root Mean Square Error*, ou erro médio quadrático normalizado, e é calculado por

$$nRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^m (P_t - \hat{P}_t)^2}{\sum_{t=1}^m P_t^2}} \quad (3.2)$$

**Mean Absolute Error** (MAE)

$$MAE = \frac{1}{m} \sum_{t=1}^m |P_t - \hat{P}_t| \quad (3.3)$$

**Mean Bias Error** (MBE). É um indicador que expressa a variação do dado obtido por meio do monitoramento em relação ao dado obtido pelo resultado das simulações.

$$MBE = \frac{1}{m} \sum_{t=1}^m (P_t - \hat{P}_t) \quad (3.4)$$

em que  $m$  é o tamanho da amostra em avaliação;  $P_t$  é a variável real medida no instante  $t$  e  $\hat{P}_t$  é a variável prevista no instante  $t$ .

Além da ASHRAE, estes índices também são recomendados pelo *International Performance Measurement and Verification Protocol* (IPMVP) e pelo *M&V Guidelines. Measurement and Verification for Federal Energy Projects* do U.S. Federal Energy Management Program (FEMP).

### 3.1.2 Validação do Programa

O método BESTEST (*Building Energy Simulation Test*), adotado pela ASHRAE como norma para teste e avaliação de programas computacionais para análise energética de edificações, sob o título de ASHRAE Standard 140 (HENNINGER; WITTE, 2004), é frequentemente utilizado como procedimento de testes e validação, pois o mesmo possui resultados de simulações de outros programas de simulação térmica de edificações, possibilitando a comparação entre os modelos.

Conforme testes realizados em outubro de 2004 pelo *Lawrence Berkeley National Laboratory* (HENNINGER; WITTE, 2004) utilizando o método ANSI/ASHRAE Standard 140, realizaram-se simulações em 18 casos, incluindo construções de baixa e alta inércia térmica, sem janelas e com janelas em diversas exposições solares, com e sem proteção solar externa, com ou sem temperaturas pré-ajustadas, com ou sem ventilação noturna, e com ou sem sistema de condicionamento de ar.

A carga anual e o pico para aquecimento e resfriamento previstos pelo EnergyPlus para 13 diferentes casos foram comparados com os resultados de 8 outros programas de simulação energética. O máximo e mínimo de modelos com temperaturas não controladas (*free-floating*) foram comparados para 4 diferentes casos. A condução no solo foi comparada apenas em um caso, em virtude das limitações dos outros programas. Com base em 62 comparações isoladas de resultados, o EnergyPlus manteve-se dentro do intervalo de resultados de 8 outros programas para 58 comparações. Para os outros 4 casos em que os resultados excederam os limites do intervalo, a variação foi menor que 5,6 %.

Os testes de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado permitiram avaliação da capacidade do EnergyPlus em calcular as cargas térmicas no ambiente, cargas de resfriamento na serpentina do evaporador, e consumo de energia do equipamento de resfriamento. Foram simulados 14 casos, incluindo variações nas condições de carga interna e externa. Os resultados previstos para os diferentes casos foram comparados com resultados de outros 7 programas de simulação energética, onde três deles foram comparados também com soluções analíticas. O EnergyPlus apresentou resultados com variações menores que 1 %, exceto para a taxa média de umidade, onde a variação foi de 3 % para casos com alta taxa de calor sensível, mas de 0,2 % para casos de baixa taxa de calor sensível.

### 3.1.3 Dados Meteorológicos

Para calibração e análise inicial dos modelos, e com a finalidade de conseguir que os resultados alcançados no presente estudo de caso, representem de maneira mais confiável o

consumo e produção de energia na edificação, utiliza-se um arquivo climático local, formado com dados medidos por meio de uma estação meteorológica (HOBO U30) (ONSET) (Figura 3.1), localizada a uma distância de 15 m da edificação e instalada a 5 m de altura, com frequência de registro de dados em intervalos de 5 minutos. Os dados registrados pela estação estão compreendidos no período entre os anos 2011 a 2016, e seus registros são tratados e sistematizados de maneira a formar um ano meteorológico típico (TMY) conjugado com sistematizações já existentes de anos anteriores (US- DOE, 2016), com base na metodologia recomendada pela (ASHRAE, 2009). Estes arquivos foram analisados em sua consistência utilizando o programa *Climate Consultant 6.0*. (MILNE, 2017).



Figura 3.1. Estação Meteorológica próxima à edificação.

### 3.1.4 Validação do Modelo

O modelo é uma abstração da realidade, que reproduz as características de um caso real ou hipotético para uma forma inteligível ao programa de simulação.

Devido à complexidade dos processos físicos a serem modelados e por ser uma edificação real, existe um especial cuidado em diminuir o máximo possível o uso de pressuposições e simplificações, que introduzam incertezas. Para a validação do modelo, faz-se necessária a inclusão de dados que contribuam para dar credibilidade às simulações realizadas. As validações dos sistemas e da edificação em estudo são de fundamental importância para a construção do modelo de referência de uma edificação com altos níveis de eficiência energética.

O Laboratório de Energias Renováveis e Eficiência Energética possui sistemas de monitoração de grandezas energéticas e ambientais. Para a validação do modelo da edificação, são usados dados medidos no espaço construído e dos sistemas instalados nesta área, que compreende desde Z01 até Z16, incluindo os espaços de circulação. A Figura 3.2 mostra o volume da área construída e utilizada para validação.

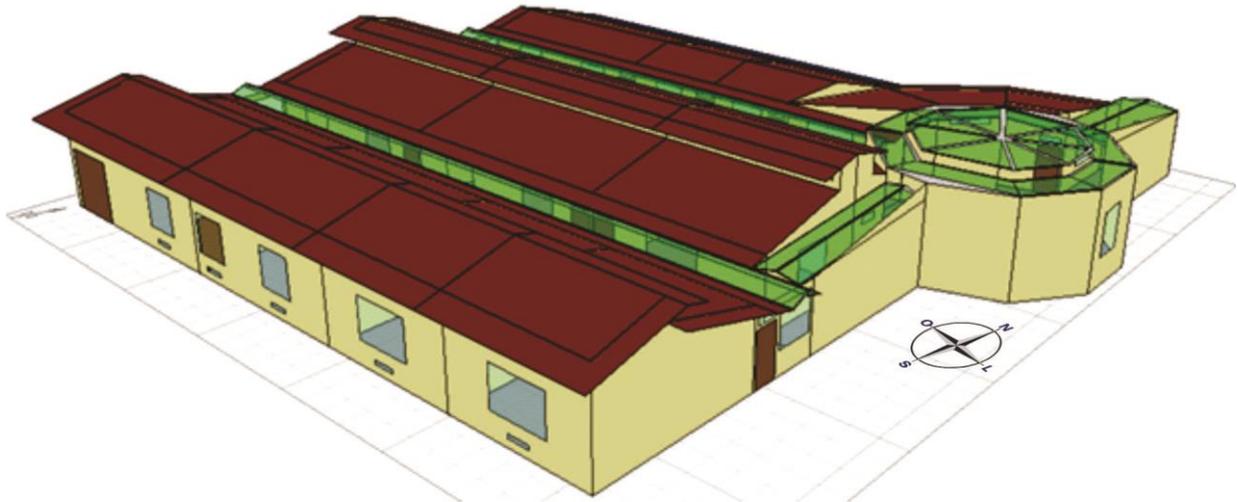


Figura 3.2. Volume da área construída da edificação.

#### 3.1.4.1 Temperatura do solo

Para a temperatura do solo e o processo de cálculo de transferência de calor às zonas, são usados o arquivo climático de referência (LABEEE, 2015) e o pre-processador *Slab* (ENERGYPLUS, 2016a). Como a edificação possui uma área considerável em contato com o solo, este item é de vital importância para o calcular o desempenho térmico. No modelo inicial foram simulados os dados de temperatura média do ar dos espaços com os arquivos climáticos disponíveis. Estes resultados são necessários para proceder à simulação mediante o pre-processador *Slab*.

As temperaturas operativas internas são calculadas em duas zonas em lados extremos do prédio (Z04 e Z11), com a finalidade de conhecer o comportamento do solo ao longo do terreno. Como pode ser visto na Figura 3.3, são calculadas as temperaturas operativas para os dias 20 a 22 de novembro (21/11 é considerado o dia de maior temperatura do ano). Nas zonas selecionadas, a diferença entre as temperaturas operativas do ar conservam a mesma tendência. Na Z04, por exemplo, a diferença entre a temperatura operativa máxima sem e com *Slab*, alcançou 0,91 °C.

Na edificação, as temperaturas operativas nos ambientes são maiores com o uso do pré-processador, alcançando uma diferença máxima de 0,99 °C nos meses de outubro e novembro, coincidindo com as altas temperaturas externas.

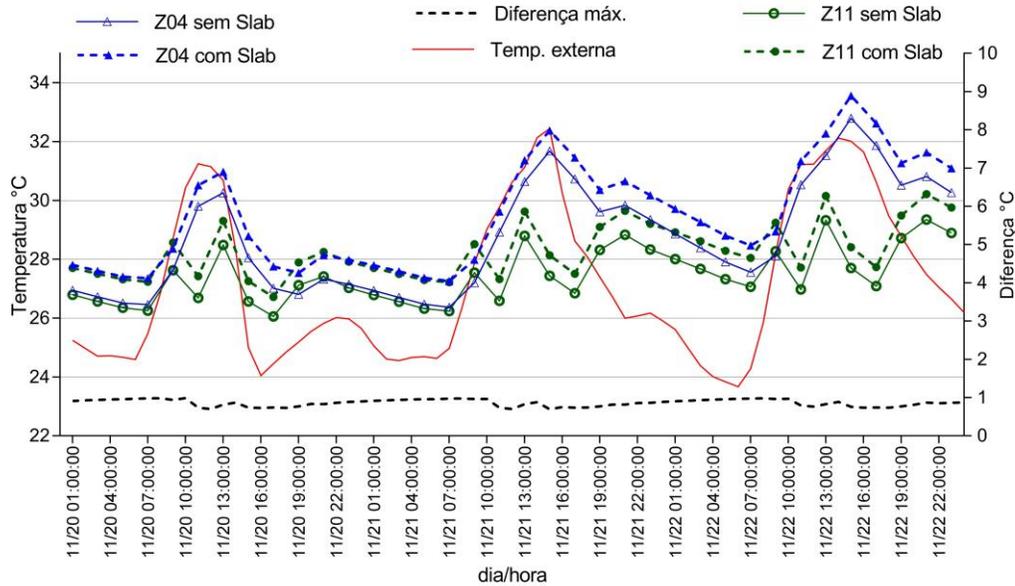


Figura 3.3. Diferenças de temperatura com e sem calcular o contato com o solo.

### 3.1.4.2 Geometria da edificação

A simulação e a validação de uma edificação dependem da influência da geometria dos seus elementos. A cobertura é um componente fundamental e, portanto, realizaram-se simulações alternando entre coberturas horizontais e inclinadas, verificando que a diferenças são mínimas na temperatura média do ar, e optando-se, então, por avaliar a cobertura com a inclinação original do projeto (Figura 2.11 e Figura 3.2). Com as formas estabelecidas, inicialmente são comparadas as projeções solares e sombras sobre a edificação construída e o modelo simulado (Figura 2.7). A Figura 3.4 apresenta as projeções solares na fachada sul da edificação e no modelo simulado para o dia 21/12 às 09h00, quando a declinação solar é máxima nessa direção, e a Figura 3.5 mostra as projeções solares sobre a fachada norte para o dia 04/05 às 15h00.

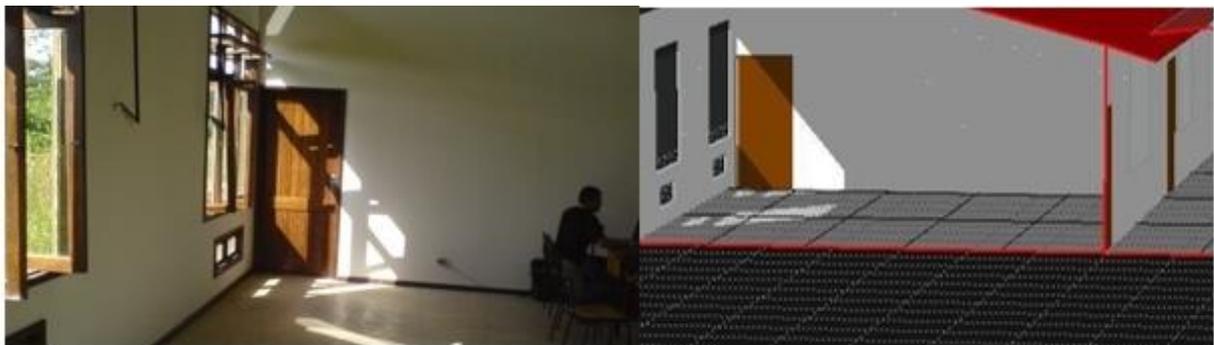


Figura 3.4. Projeções solares na fachada sul (esq. edificação - dir. modelo).

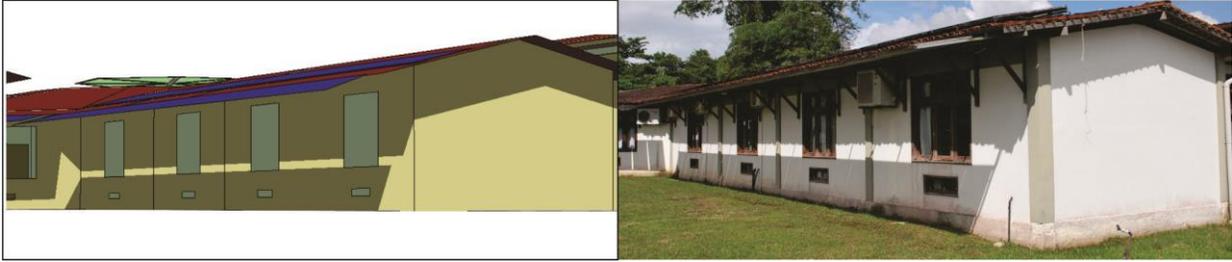


Figura 3.5. Projeções solares na fachada norte (esq. modelo - dir. edificação).

### 3.1.5 Medições e Simulações

De modo geral, nesta seção trabalha-se com os dados medidos e com os dados simulados, com o intuito de validar ou extrapolar os resultados. Os resultados gerados pelo método de simulação correspondem às mesmas datas, espaços e horas das medições, com a finalidade de mostrar a compatibilidade entre o modelo computacional em estudo e o modelo real. Assim, verificados os materiais, a geometria e os ganhos de calor, procede-se à comparação das temperaturas internas simuladas com os valores medidos.

Na edificação foram realizadas medições de temperatura interna em todas as salas, consumo de energia em iluminação, equipamentos e sistemas de condicionamento de ar no quadro geral e potência elétrica ativa dos equipamentos de condicionamento de ar, para curtos períodos de tempo, das salas Z11, Z13 e Z03.

#### 3.1.5.1 Temperatura interna

Para o monitoramento da temperatura da edificação, utilizaram-se equipamentos sensores/armazenadores de dados (*data loggers*) da Marca HOBO, modelo U12 (Figura 3.6) (ONSET). Os medidores apresentam exatidão de  $\pm 0,35$  °C, e são programados para adquirir as informações em intervalos de 5 minutos, que são posteriormente convertidos em médias horárias e comparados com os dados obtidos nas simulações computacionais.

Durante a medição os espaços foram usados normalmente, as portas abertas pelos usuários dependendo da necessidade, e os equipamentos de condicionamento de ar ligados, dependendo das condições internas. Para as simulações, então, são incluídas trocas de ar por infiltração permanentemente, correspondente a uma troca de ar por hora.

Para comparação dos resultados com os valores medidos na edificação real foi requeridos como dados de saída do modelo a temperatura média do ar e a temperatura operativa no interior de cada zona térmica (°C), dando preferência às zonas que recebem radiação solar nos solstícios de inverno e verão (norte e sul). Caracterizar estas variáveis o mais próximo do real é um fator

importante para garantir que grande parte dos fluxos de calor de maior consumo na edificação estará bem representada.

A Figura 3.7 mostra as curvas comparativas entre a temperatura interna medida na Z03 (sul) e na Z13 (norte) para o DDY, e a temperatura obtida na simulação para ambas as zonas. O coeficiente de variação do erro quadrático médio (CV (RMSE)) calculado para a temperatura interna é 4,96 % na Z03 e 4,86 % para a Z13, enquanto o erro de polarização média (MBE) é de -13,52 % para a Z03 e de 3,04 % para a Z13.



Figura 3.6. Medidores de temperatura e umidade.

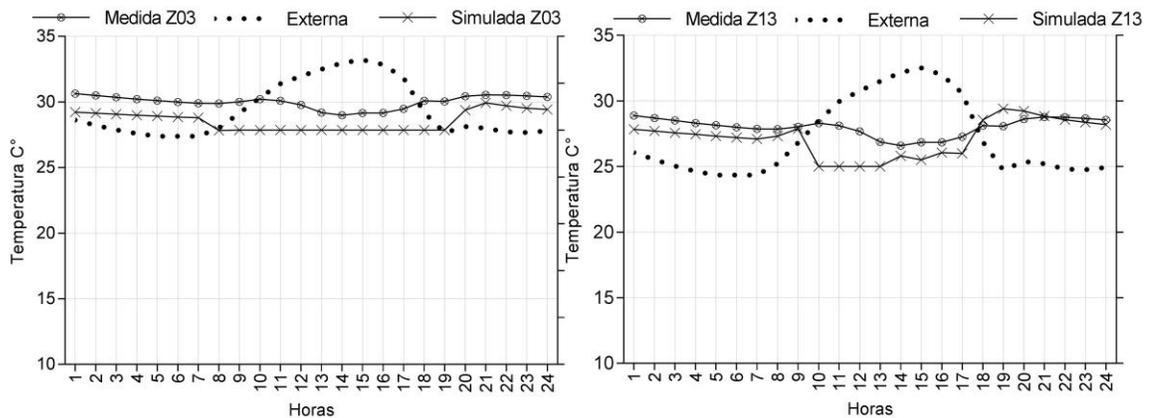


Figura 3.7. Curvas de temperatura interna medida e simulada para as Z03 e Z13.

### 3.1.5.2 Consumo de energia por uso final

MANITO (2012) desenvolveu um programa computacional em ambiente *LabView*, para a monitoração e a avaliação do desempenho energético da edificação em estudo. Neste programa há um módulo destinado à monitoração de grandezas elétricas relacionadas ao uso final e à geração

de energia na edificação, de acordo com a divisão dos circuitos elétricos no quadro geral, os quais são denominados de. Geral, Fotovoltaico, Iluminação, Equipamentos e Climatização. Desta forma, é possível coletar diversos parâmetros elétricos dos circuitos relacionados ao tipo de utilização final das cargas. A divisão dos circuitos facilita a análise dos dados monitorados, pois permite que seja conhecido o consumo dos tipos de circuitos individualmente, permitindo a verificação da economia de energia propiciada por estratégias adotadas na edificação quanto ao uso de sistemas de iluminação, climatização artificial e geração de energia.

Um microcomputador executando o programa de aquisição de dados desenvolvido gerencia a comunicação com os medidores multigrandezas via rede serial RS-485 utilizando o protocolo *Modbus*. O programa computacional possui uma interface para visualização dos dados monitorados na forma de gráficos. A Figura 3.8 apresenta o computador utilizado para a monitoração e o quadro geral de distribuição da edificação com os medidores multigrandezas. Para medição específica do consumo de energia elétrica de alguns aparelhos para condicionamento do ar é empregando um analisador de energia trifásico com exatidão de  $\pm 1,4\%$  na medição de energia elétrica ativa.



Figura 3.8. Computador que gerencia a rede Modbus e medidores instalados no quadro geral de distribuição.

### • Iluminação

Para avaliar o consumo de energia elétrica em iluminação artificial, foram realizadas medições de consumo durante o período entre janeiro de 2012 e dezembro de 2016. Os dados usados para simulação, são correspondentes às tecnologias usadas na época de construção (lâmpadas T5 de 28W) e instaladas no prédio.

De posse desses dados, cria-se um arquivo denominado ano típico, formado pelas médias horárias de cada ano. Para melhor representação dos coeficientes de variação entre os dados medidos e simulados, é formado um dia típico de consumo do mês de novembro e comparado com os dados simulados para o dia 21/11, dia de projeto determinado como o dia mais quente do ano para a cidade de Belém. A Figura 3.9 mostra a comparação entre os dados do dia típico medido e

os dados simulados para o DDY (21 de novembro). A iluminação durante a noite e finais de semana apresentou valores muito baixos e, portanto, foram desprezados para as análises de iluminação.

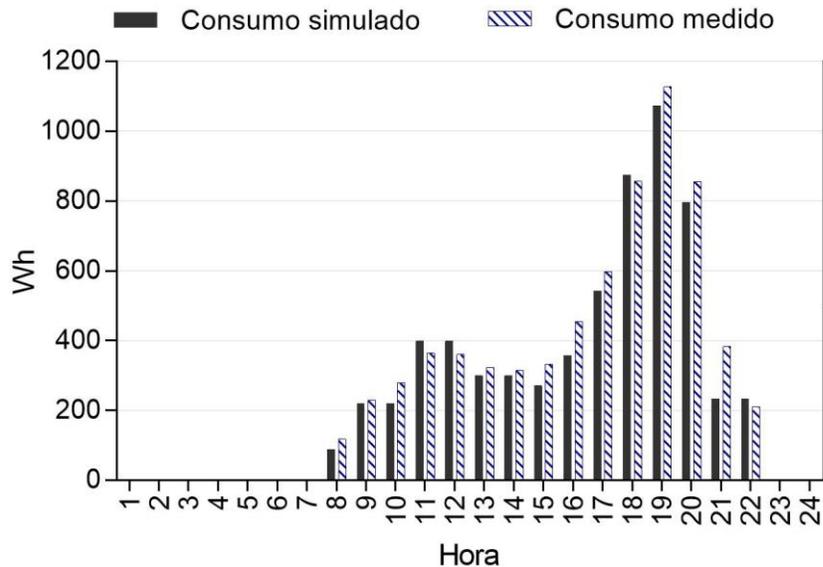


Figura 3.9. Consumo de energia simulado e medido para o dia típico de novembro.

O coeficiente de variação do erro quadrático médio (CV (RMSE)) calculado para a iluminação de um dia típico no mês de novembro é de 16,72 %, enquanto o erro de polarização média (MBE) é de 7,37 %.

#### • Equipamentos

O consumo em equipamentos e outros usos da edificação deriva-se principalmente de computadores, equipamentos de laboratórios, de oficina mecânica e tomadas em geral. As medições do consumo e equipamentos, da mesma forma que para iluminação, são formadas em um ano típico e, posteriormente, gera-se um dia típico do mês de novembro, para ser comparado com as simulações para este período. As rotinas de uso de equipamentos inseridas no programa são configuradas com a rotina de uso descrita pelos usuários. A Figura 3.10 mostra as curvas de comparação entre o dia típico de consumo medido e simulado.

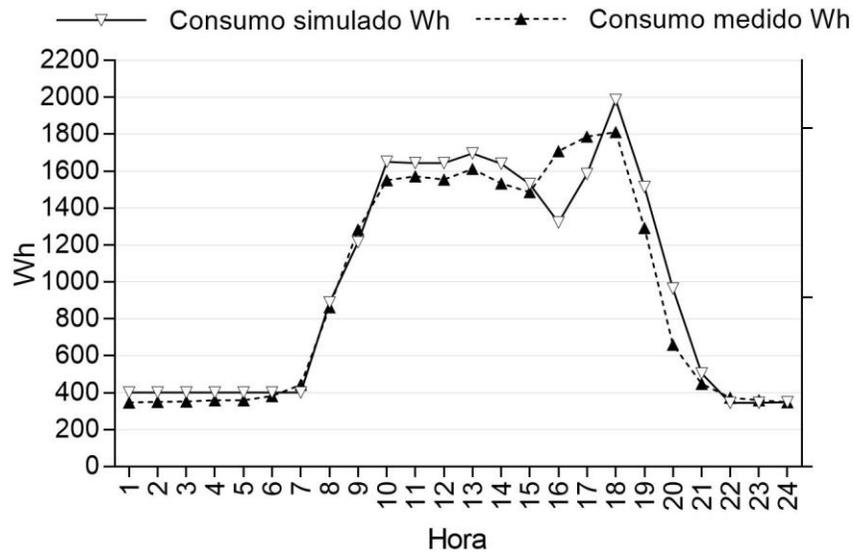


Figura 3.10. Consumo de energia em equipamentos para o DDY.

O coeficiente de variação do erro quadrático médio (CV (RMSE)) calculado para o consumo de energia elétrica em equipamentos do dia típico no mês de novembro é de 14,03 %, enquanto o erro de polarização média (MBE) é de -3,46 %.

#### • Condicionamento de ar

As rotinas de uso dos equipamentos para condicionamento de ar foram definidas pelos usuários, mediante planilhas fornecidas para registrar os horários em que os aparelhos de condicionamento de ar foram ligados e desligados durante 30 dias úteis. Este período é usado como base para inserir rotinas (*schedules*) no programa, o mais próximo possível à realidade. Também foi realizado um levantamento técnico das características de fábrica dos aparelhos e inseridos no programa.

As medições de consumo de energia para condicionamento de ar foram realizadas nas mesmas condições já referidas para medições de consumo em iluminação e equipamentos. A Figura 3.11 representa o consumo de energia para condicionamento de ar durante o DDY em comparação com o dia típico formado com os dados medidos.

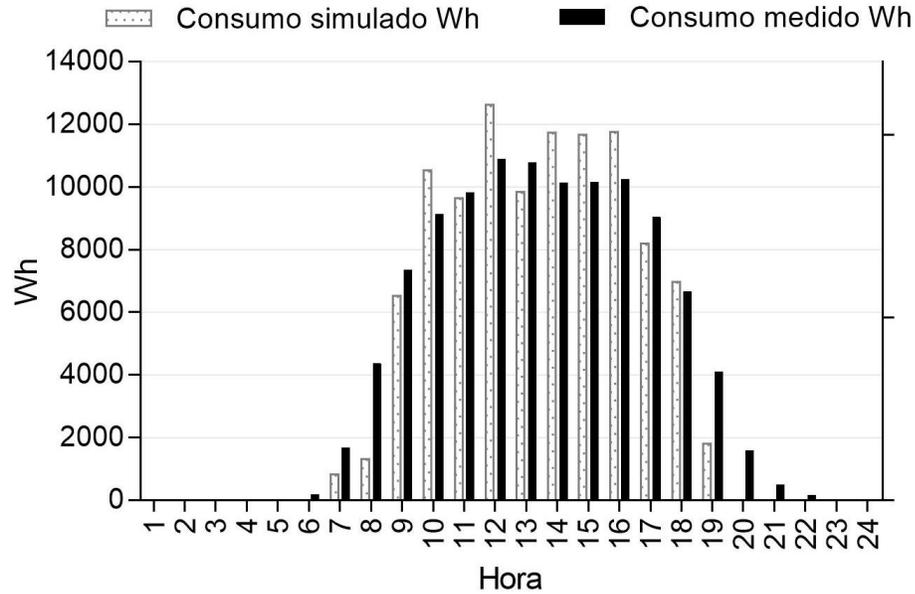


Figura 3.11. Consumo de energia em condicionamento de ar.

Para uma melhor aproximação de dados, foram realizadas medições em curtos períodos de tempo para duas unidades de condicionamento de ar específicas (Z11 e Z13). Para estas medições foi usado um analisador de energia trifásico com exatidão de  $\pm 1,4\%$  na medição de energia elétrica ativa. Os dados são apresentados na Figura 3.12, que mostra as curvas de comparação entre a energia ativa medida e simulada na Z11.

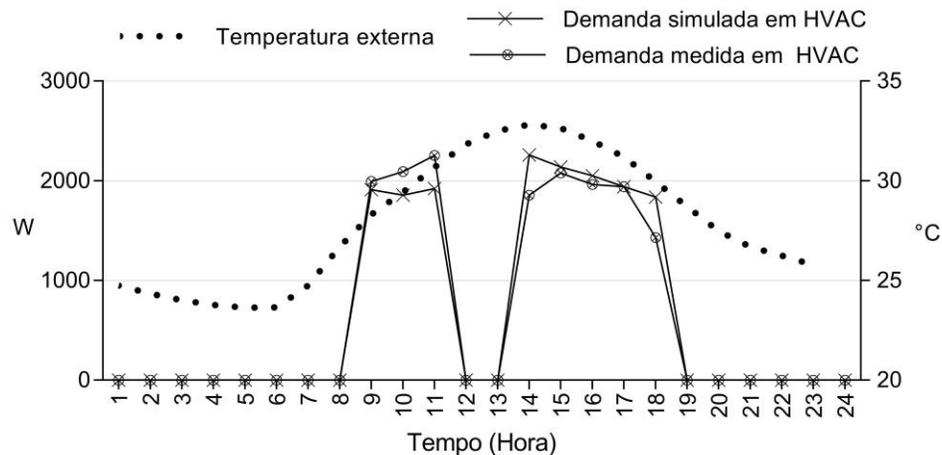


Figura 3.12. Dados de demanda de potência elétrica ativa do aparelho de condicionamento de ar da Z11.

O Coeficiente de Variação do Erro Médio Quadrático (CV (RMSE)) calculado para a demanda de potência ativa é de 22,54 %, enquanto o Erro Médio de Polarização (MBE) para a

demanda de eletricidade é de -2 %. Os erros apresentados devem-se ao fato das medições, para este caso, terem sido realizadas para 5 dias de uso e comparadas com os dados simulados.

### 3.1.6 Consolidação do Modelo

Realizadas as correções das variáveis de entrada do modelo a partir de comparações entre o desempenho real e o simulado da edificação, percebe-se que os dados simulados no modelo calibrado, quando comparados com as medições registradas apresentam faixas de erro menores que 30 % para medições horárias e inferiores a 15 % para medições mensais, o que pode ser considerado aceitável para este tipo de análise, segundo os valores especificados pela ASHRAE (2014) e avaliados por RUIZ; BANDERA (2017).

Posteriormente, seguindo os parâmetros utilizados para os diferentes ajustes sobre o modelo da edificação construída, procede-se à modelagem e análise do edifício completo (área construída e projetada), chamado de Laboratório de Energias Renováveis e Eficiência Energética, apresentado ao longo deste estudo.

#### 3.1.6.1 Modelo base M\_01

O modelo inicial, definido como modelo base (M\_01), é usado com o intuito de reproduzir elementos arquitetônicos e materiais usados comumente na região e na instituição à qual pertence. O modelo base é apresentado na Figura 3.13.

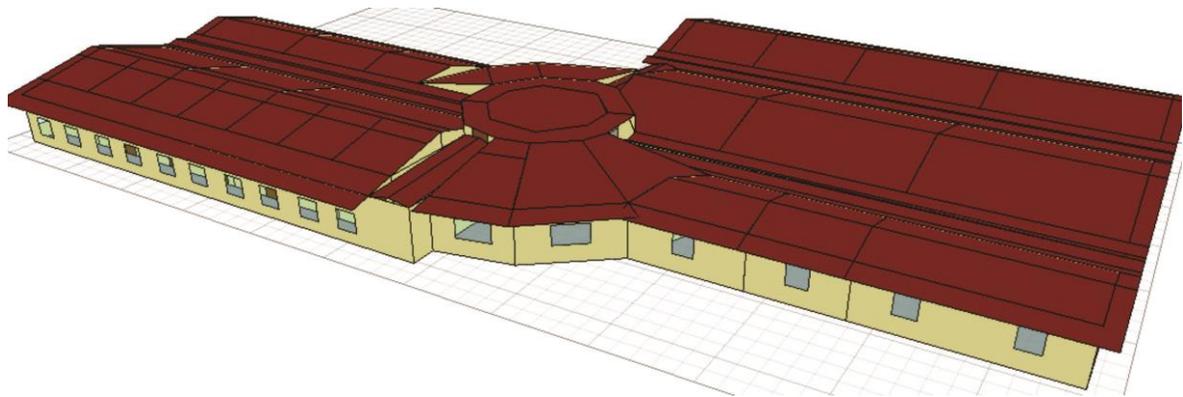


Figura 3.13. Volumetria do modelo base.

## 3.2 MEDIDAS DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA - MCE

Como continuação, aplica-se então uma série de MCE com a finalidade de calcular e analisar o impacto de cada uma delas no desempenho térmico e lumínico e no consumo final de energia, em termos de energia conservada e carga térmica evitada. Nas avaliações não são incluídas variações em estrutura e formas, equipamentos ou sistemas de condicionamento de ar. As medidas aplicadas fazem parte do projeto do Laboratório de Energias Renováveis e Eficiência Energética, e os princípios de eficiência energética aplicados e de arquitetura bioclimática, que servem como base a este trabalho, são mencionados na fase de projeto por AGUILAR (2004).

Neste estudo, as avaliações do nível de eficiência energética na edificação são feitas de forma comparativa e focam as MCE que são aplicadas gradativamente no modelo base. Estas medidas pretendem aumentar a disponibilidade de iluminação natural e reduzir o consumo de energia em iluminação artificial, diminuir os valores de transmitância térmica da envoltória e a absorvância das superfícies e, conseqüentemente, reduzir o consumo de energia elétrica para resfriamento. São aplicadas também medidas que, além de favorecer o desempenho térmico, contribuem para a produção de energia elétrica no local, para atender parte da demanda, especificamente com sistemas fotovoltaicos para geração de energia.

### 3.2.1 MCE-01 - Iluminação Natural

A iluminação natural só proporciona economia energética quando é capaz de substituir temporalmente a iluminação artificial. Entretanto, as economias obtidas da iluminação natural em um espaço não dependem exclusivamente da disponibilidade de iluminação natural no lugar da tarefa, mas também de quando e como o usuário utiliza dispositivos de sombreamento (como persianas) ou elementos de controle e regulação da iluminação artificial (FERNÁNDEZ et al., 2014).

Para definição dos elementos-chave da iluminação natural sob o enfoque da sua influência no consumo energético considera-se a sua influência no sistema de iluminação artificial e no balanço térmico da edificação. Portanto, opta-se por estratégias que, além da economia em energia para iluminação artificial, objetivam melhorar e/ou otimizar a quantidade e a distribuição de luz natural em cada um dos espaços que proporcionam acesso ao exterior.

Em geral considera-se que a utilização da iluminação natural traz benefícios ao bem-estar dos ocupantes, mas sua ausência pode proporcionar danos à saúde. Diversos estudos mostram como a iluminação natural atua diretamente não só na percepção dos usuários, como também no seu conforto, facilitando melhorias no seu desempenho (BELLIA *et al.*, 2013) (TOLEDO;

CÁRDENAS, 2015). Para BELLIA *et al.* (2014) a luz do dia é a melhor luz disponível em termos de propriedade de representação de cor, uma vez que sua distribuição espectral de potência (DEP) possui todos os comprimentos de onda do espectro visível e porque os olhos humanos se adaptaram à luz do dia no decorrer de milênios. A autora caracteriza a luz natural como um dos principais agentes ambientais que estimulam o sistema circadiano, concluindo que a importância de quantificar, ou pelo menos estimar, o impacto que a fonte tem sobre o relógio biológico do cérebro humano na fase de projeto é de grande importância, garantindo desta forma o bem estar dos usuários.

Na edificação são utilizados sistemas que possibilitam a entrada de luz nos espaços: entradas de luz pela cobertura com lanternim; janelas de maiores dimensões (modificando a relação abertura-parede) à altura do plano de trabalho; e balancins altos sobre as janelas e portas internas e externas, para distribuição uniforme da iluminação natural. Nos espaços de circulação interna, por serem espaços de permanência transitória (de ocupação não constante), opta-se pela iluminação zenital, através do uso de *skylights*, que têm como objetivo melhorar ou otimizar a quantidade e a distribuição de luz natural na circulação e, conseqüentemente, nas salas anexas.

Destaca-se a importância dos balancins superiores, pois estes captam a luz do zênite e do céu de maneira eficiente, guiando-a com maior profundidade e uniformidade para o interior dos ambientes. A Figura 3.14 mostra as estratégias aplicadas para aproveitamento de iluminação natural, e a Tabela 3.1 apresenta as diferenças em relação ao modelo M\_01.

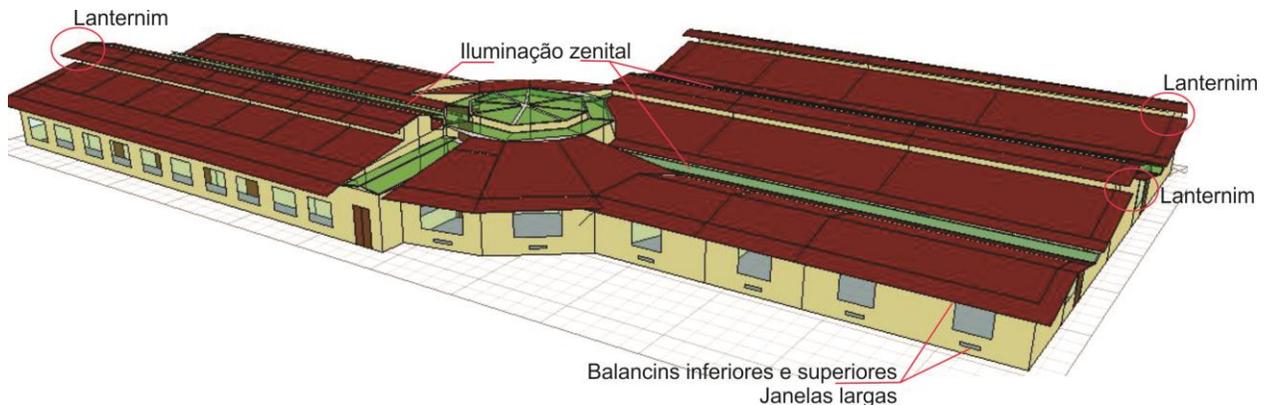


Figura 3.14. Volumetria do modelo M\_01 com MCE-01 aplicada.

Tabela 3.1. Diferenças de aberturas após a aplicação da MCE-01.

	<b>M_01</b>	<b>M_01 com MCE-01 para iluminação</b>
Norte (°)	-19	-19
Área de aberturas (m <sup>2</sup> )	49,16	160,26
WWR (%)	8,56	22,31
SRR (%)	0	12,89
Aberturas parede Norte (m <sup>2</sup> )	23,77	70,88

### 3.2.1.1 Simulações computacionais para avaliação da MCE-01

O programa utilizado para avaliação da contribuição da iluminação natural é o DAYSIM/RADIANCE, que permite estudos de luz natural mais precisos e validados. Este programa é capaz de correlacionar simulações de luz do dia com dados climáticos e tem mais opções para configurações de ocupação e controles de luz diurna. Entre os relatórios gerados inclui: fator de luz do dia (DF); autonomia de luz do dia (DA); índice de luz de dia útil (UDI); e potencial de brilho do dia (DGP).

Com as simulações podem ser gerados três resultados, isto é, das simulações do DAYSIM, são obtidos os valores de DA, DF e UDI, os quais são utilizados na análise do desempenho da iluminação natural. Também é gerado um arquivo com relatório de rotinas, para ser inserido no EnergyPlus, para fornecer os resultados de consumo de energia, considerando-se o uso de dimerização, ou controle do sistema de iluminação artificial, e os resultados de consumo de energia sem controle automatizado da iluminação. Os relatórios conseguidos através dessa metodologia são utilizados na análise dos resultados.

#### - Autonomia de luz natural (DA) e fator de luz do dia (DF)

Para avaliação da autonomia da luz natural são considerados sensores distribuídos nas salas a cada 0,90 m, com altura do plano de trabalho de 0,75 m. Os resultados mostram a porcentagem das horas ocupadas do ano em que o nível mínimo de iluminância estipulado é atingido em cada ponto, somente pelo incremento da luz natural.

FERNÁNDEZ *et al.* (2014), citando o Comitê de Métricas de Iluminação Natural da *Illuminating Engineering Society* (IES), definem usar 50 % do tempo como limite temporal para considerar um espaço iluminado naturalmente (DA), durante horário compreendido entre as 08h00 e as 18h00. Em termos de fator de iluminação natural (DF), os pontos de cálculo devem ter um valor maior ou igual a 2 %, para representar a contribuição da iluminância difusa que garante a obtenção da quantidade de lux solicitada para cada sala, pelo menos na metade do limite temporal estabelecido (REINHART; WALKENHORST, 2001).

A Figura 3.15 apresenta curvas de autonomia de luz natural para cinco zonas, selecionadas por representar as características dos espaços em cada bloco da edificação, comparando entre os dois modelos a porcentagem de horas do ano que cada ponto é atingido pela luminosidade requerida no programa, com base na norma ISO/CIE (ABNT, 2013), definida para construções educacionais. As zonas escolhidas e seus requerimentos em lux pela norma são apresentados na Tabela 3.2.

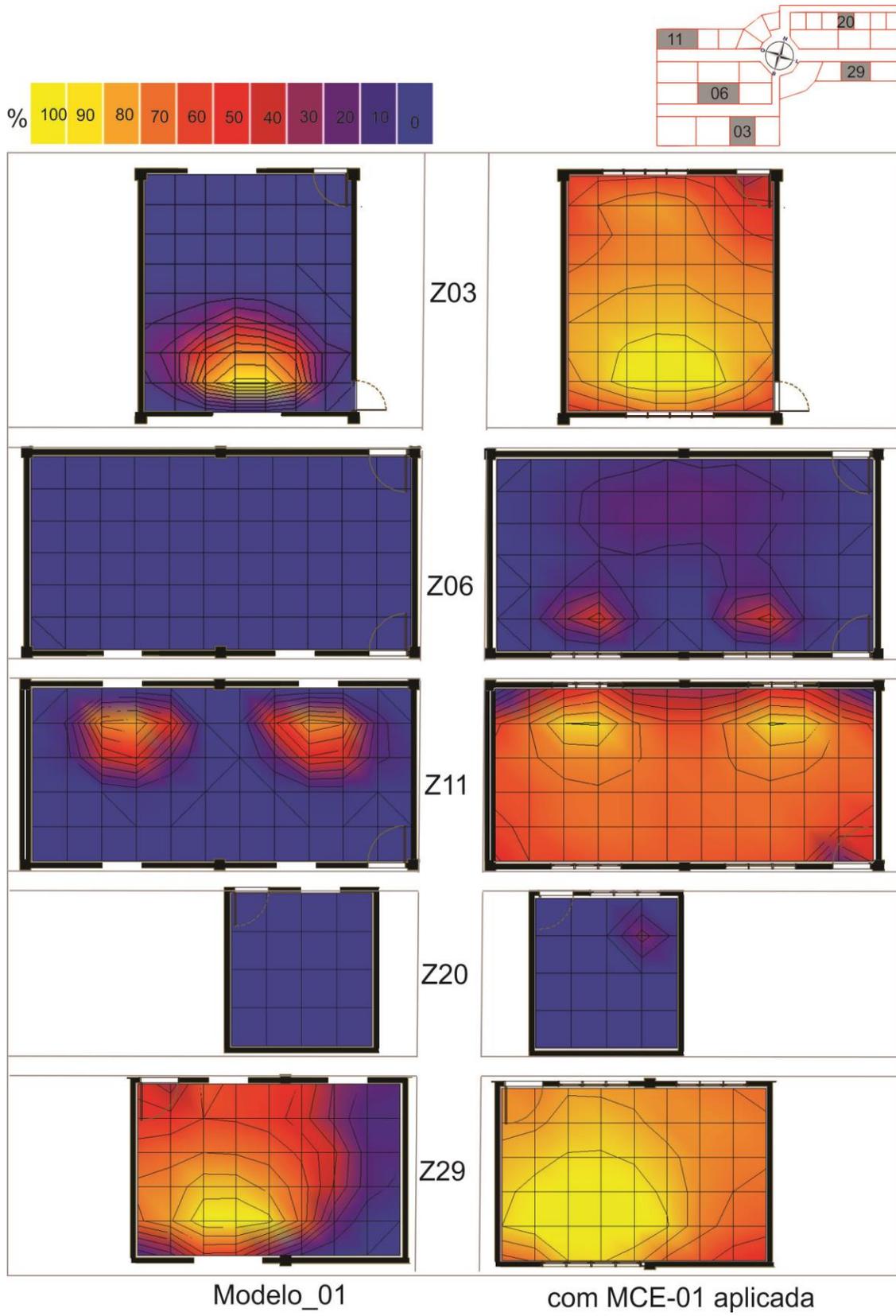


Figura 3.15. Comparação de curvas de autonomia de luz natural nas 5 zonas do M\_01.

Tabela 3.2. Zonas escolhidas e características.

Zona	Função	Atividade (ISO/CIE)	lux
Z03	Monitoração e Controle	Estações de projeto assistido por computador	500
Z06	Laboratório de Energia Solar	Sala de aplicação e laboratório	500
Z11	Laboratório de Conforto Ambiental	Sala de aplicação e laboratório	500
Z20	Sala de Professores	Sala de Professores	300
Z29	Salas de Aula	Salas de Aula	300

Nota-se que no modelo base (Modelo\_01), e pelas características das aberturas, existem espaços que não alcançam os níveis suficientes de autonomia em iluminação natural para desenvolvimento das atividades neles propostas. Após a aplicação da MCE para aproveitamento da iluminação natural, a maioria dos espaços avaliados apresentam porcentagens consideradas aceitáveis de iluminação natural. Entretanto, percebe-se que a medida não proporciona luminosidade suficiente para as zonas internas ( Z06 e Z20, por exemplo). Embora estes espaços recebam iluminação natural pela circulação anexa (*skylight*) e lanternins, esta não é suficiente para a realização das tarefas.

Na Z03, por exemplo, unicamente 8 % dos pontos da malha estabelecida têm um valor maior ou igual a 2 % de FD; porém, com a aplicação da MCE-01, 82 % dos pontos alcançam um índice acima de 2 %. Igualmente, a autonomia de luz natural para todos os sensores do plano de trabalho fica entre 50 % e 97 %, o que significa que na metade do tempo das horas de ocupação a iluminância em qualquer ponto é superior ao mínimo requerido de 500 lux para a Z03. Na Z06, o FD encontra-se em uma porcentagem sempre abaixo de 2 %, concluindo-se que a iluminância nunca é superior à requerida (500 lux), e a porcentagem de autonomia alcançada não é suficiente para as tarefas, determinando o uso de iluminação artificial em todas as horas de uso, nos dois modelos. A Z11 possui aberturas que comunicam com a área externa e a porcentagem aumenta próximo às janelas, registrando uma grande autonomia, que beneficia a economia em energia elétrica usada para iluminação artificial.

### - Simulação Integrada EnergyPlus-Daysim/Radiance

Para configuração dos modelos e avaliação do consumo de energia em iluminação artificial, os relatórios adquiridos do Daysim são modificados em função do critério do UDI no intervalo de 100 lux a 2.000 lux.

O programa Daysim fornece o valor das iluminâncias para cada ponto. Encontrados os pontos com UDI específico para o nível de iluminância requerido, avalia-se o Percentual Útil de Iluminação natural (PULN) de acordo com o ambiente, sendo possível estabelecer, de acordo com a quantidade de lux recebida em cada ponto, a necessidade de iluminação artificial para as tarefas

ali desenvolvidas.

Nesta análise é realizada a contagem da quantidade de pontos que recebem iluminância inferior à requerida em lux, em intervalos horários. Quando a porcentagem de pontos da zona que recebem uma iluminância inferior à requerida é de 50 %, considera-se que a iluminação artificial é necessária nessa hora. Com estes valores são criados cronogramas (*schedules*) de iluminação para cada zona e inseridos no EnergyPlus, gerando rotinas de uso de iluminação artificial em função da necessidade de iluminação de cada zona. Assim mesmo, quando a porcentagem de pontos que recebem iluminância superior a 2.000 lux é superior a 20 %, considera-se como necessário o fechamento das janelas e, conseqüentemente, o uso de iluminação artificial.

A Figura 3.16 mostra a Z11 e os pontos mais próximos às janelas externas para o dia 21/06, quando a declinação solar é maior para o lado norte, determinando, para cada hora do dia, a quantidade de pontos que recebem uma iluminância maior a 500 lux (laranja) e pontos com luminosidade superior a 2.000 lux (amarela).

Para o Modelo\_01, tanto na Figura 3.15 quanto na Figura 3.16 percebe-se que a Z11, por exemplo, não recebe iluminação natural suficiente para desenvolvimento das atividades nela previstas. Nota-se também na Figura 3.16 que nos locais mostrados, a quantidade de pontos que recebem iluminância de 500 lux não ultrapassa 24 % às 14h00, determinando o uso de iluminação artificial durante todo o horário de uso. Após a aplicação da iluminação zenital e o aumento das aberturas na parede norte, a Z11 recebe iluminação suficiente entre as 09h00 e as 15h00. Este intervalo de tempo sem necessidade de iluminação artificial, representa a economia alcançada.

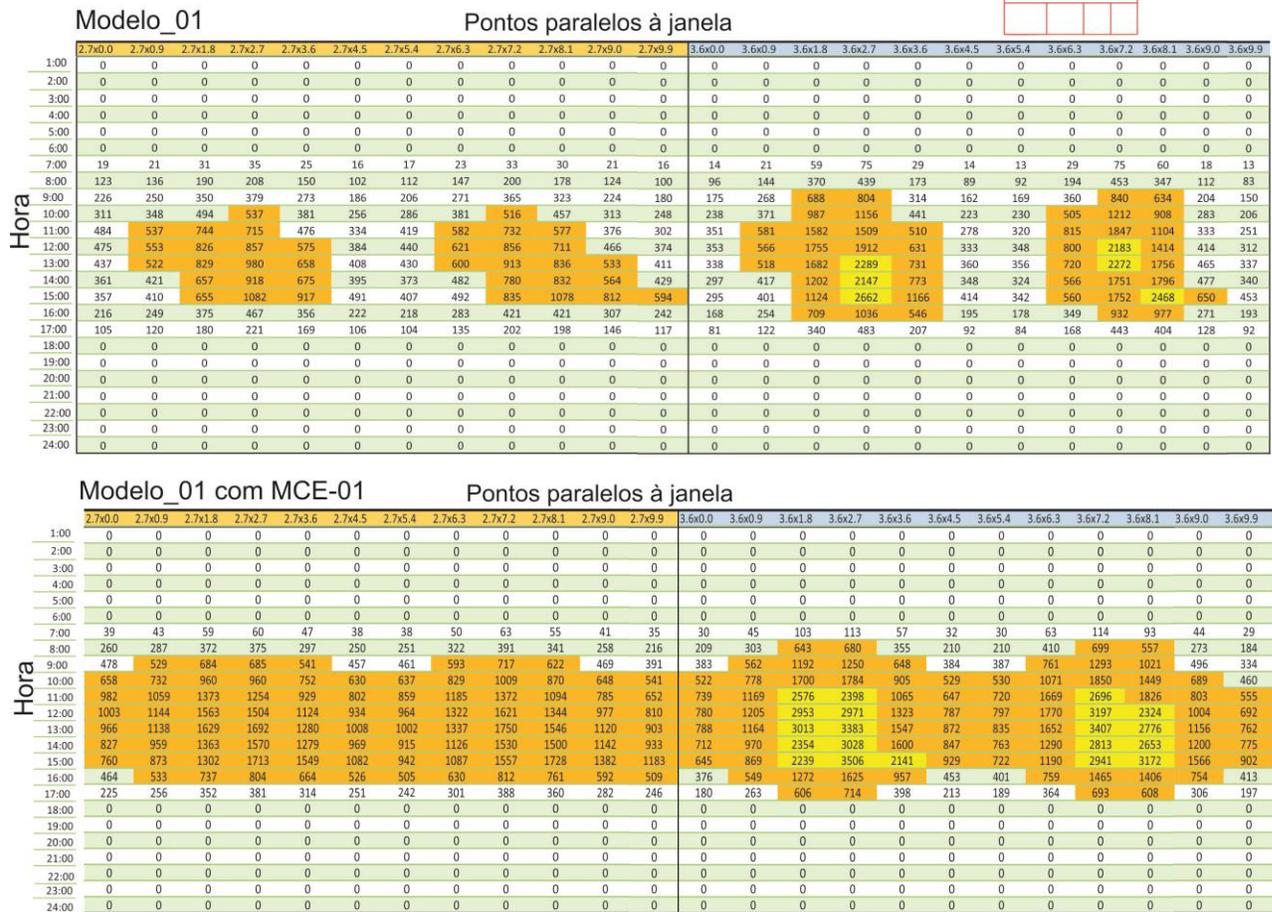
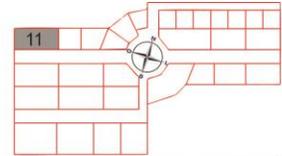


Figura 3.16. Pontos com luminosidade superior a 500 lux na Z11 para o dia 21/06.

### 3.2.1.2 Impacto no consumo de energia elétrica

Os níveis de autonomia de iluminação natural e o consumo de energia em iluminação artificial são calculados considerando tempos de uso das salas dependendo das atividades nela realizadas. Considera-se um horário geral das 07h00 às 20h00 durante os dias da semana, um modelo de usuário ativo por definição (*default*), e um interruptor manual localizado próximo às portas para cada fileira de luminárias paralelas às janelas. Isto implica que a zona está ocupada por um usuário ativo na hora de controlar a iluminação, quando há falta de suficiente luz natural, e os dispositivos de sombreamento, quando necessários. Embora este sistema de controle por si só não contribua para o melhoramento da eficiência energética, pois depende do comportamento do usuário, constitui-se na ferramenta mais adequada quando se realizam atividades diferentes em um espaço.

Pelas características apresentadas entre o modelo base (M\_01) e o modelo com MCE-01 aplicada, a diferença entre o atendimento com iluminação natural e o uso de horas em iluminação

artificial é perceptível ao fazer uso da simulação para entender a edificação com um todo. Estas diferenças são mostradas na Figura 3.17, que apresenta as diferenças de consumo nos dias denominados dias de projeto (21/02 e 21/11), na Figura 3.18, que apresenta as diferenças entre consumo anual nas zonas exemplificadas, e na Figura 3.19, que mostra o consumo mensal de energia elétrica com iluminação artificial.

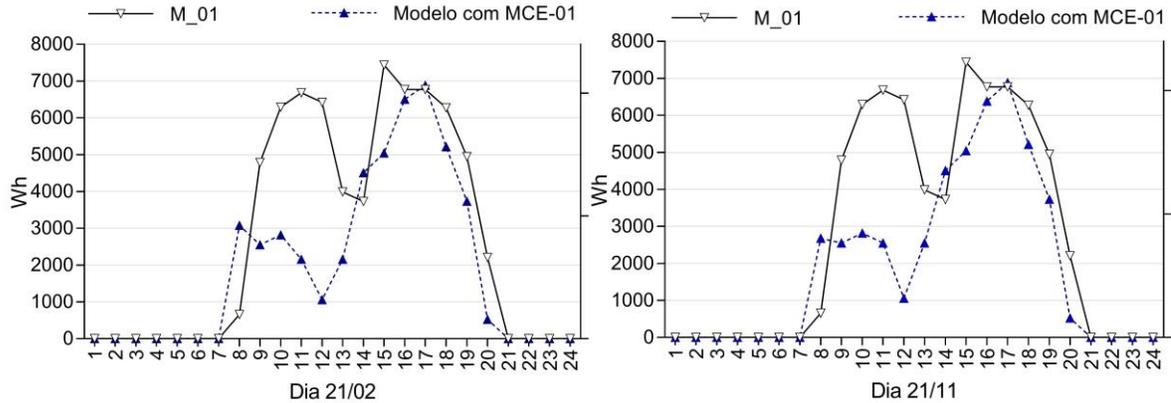


Figura 3.17. Consumo nos dias de projeto com iluminação artificial.

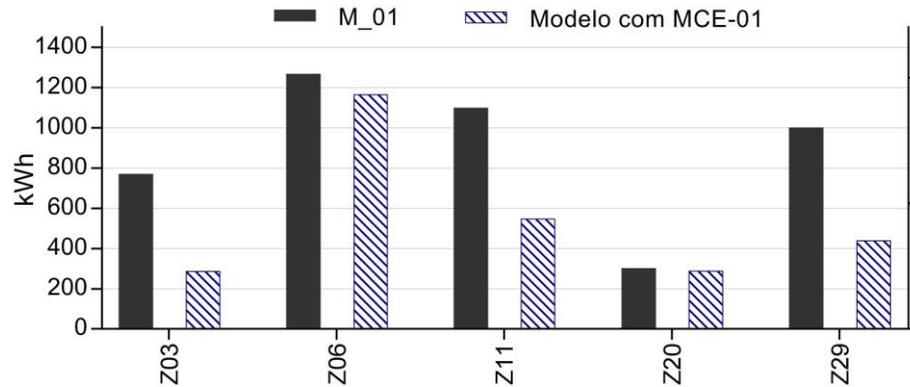


Figura 3.18. Consumo anual nas zonas exemplificadas.

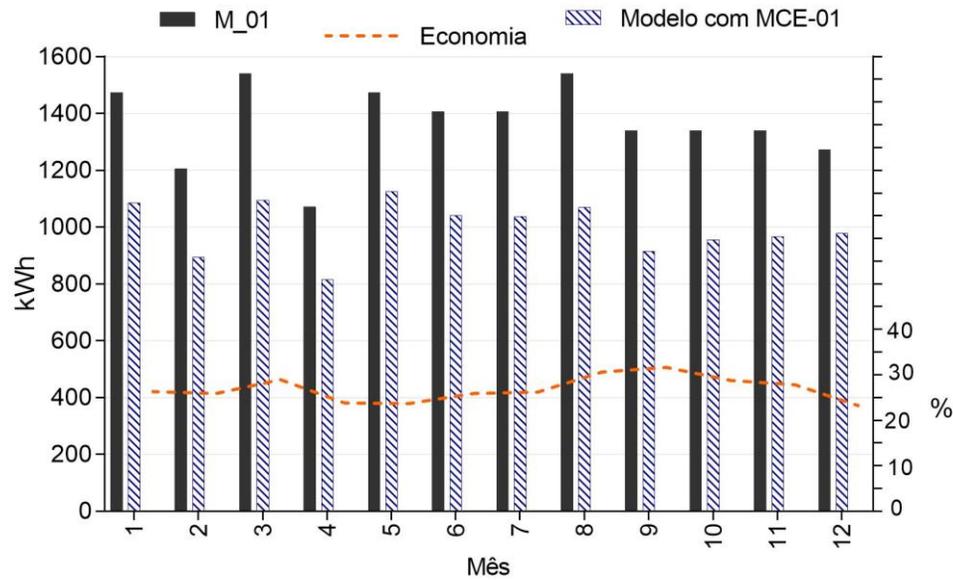


Figura 3.19. Consumo mensal com iluminação artificial.

A MCE-01 relacionada ao aproveitamento da iluminação natural mediante as estratégias aplicadas na edificação (Figura 3.14) mostra-se eficiente em relação ao consumo de energia ativa para uso final em iluminação artificial. O total de consumo anual para o M\_01 em iluminação é de 16.404,05 kWh, representando 16,4 % do consumo total de energia elétrica da edificação.

Com a aplicação da MCE-01, este consumo anual em iluminação artificial é reduzido a 11.975,2 kWh, e sua equivalência no consumo total se reduz igualmente a 11,7 % do modelo modificado. Nesta ordem, a economia anual obtida é de 4.429,24 kWh, e a maior economia apresenta-se no mês de setembro com 423,88 kWh/mês, isto é, de 31,65 % com relação ao modelo sem a medida no mesmo mês.

A economia em consumo de energia para iluminação artificial representa 27 % ao ano em relação ao consumo de energia em iluminação do modelo base. Esse resultado comprova a eficácia das estratégias instaladas para aproveitamento da iluminação natural; no entanto, faz-se necessário ter controle sobre as medidas, para evitar incremento de carga térmica ao ambiente.

### 3.2.2 MCE-02 - Isolantes Térmicos e Câmara de Ar

A Medida de Conservação de Energia denominada MCE-02 consiste na instalação de isolantes térmicos nas superfícies que recebem maior radiação solar durante o dia, como são a cobertura e as paredes leste e oeste e a inclusão de uma câmara de ar no forro.

Na cobertura é instalada uma manta térmica de lã de vidro aglomerado com resinas sintéticas, revestido em ambas as faces; Na face superior uma película aluminizada e na face inferior um laminado branco, de 0,05 m de espessura, sob a telha cerâmica e apoiada no madeiramento, seguida, em ordem descendente, por uma câmara de ar de 0,40 m, e forro de PVC. Nas fachadas leste e oeste, entre duas paredes de tijolo furado de 0,09 m de espessura, é instalado um painel rígido de fibra de vidro de 0,07 m de espessura. A Figura 3.20 mostra as medidas aplicadas tanto no telhado quanto nas paredes.

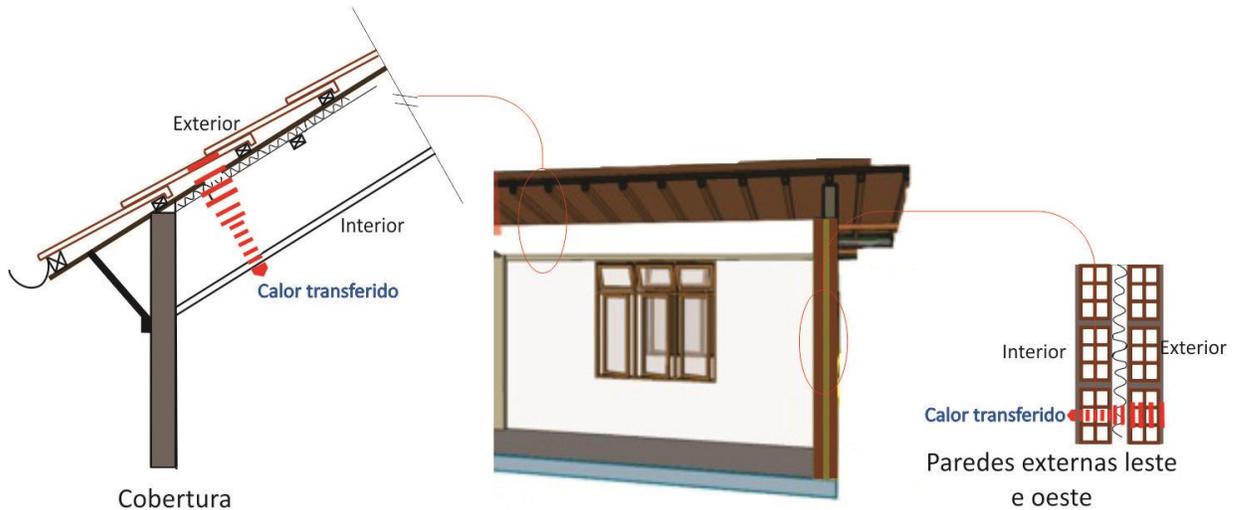


Figura 3.20. MEC-02. Isolante térmico e câmara de ar.

### 3.2.2.1 Análise de cargas térmicas

O isolante térmico e a câmara de ar comportam-se como atenuantes do calor transferido e, conseqüentemente, diminuem as cargas térmicas que são transmitidas pela superfície para o interior dos espaços. A Tabela 3.3 mostra as propriedades dos conjuntos utilizados em cada modelo.

Tabela 3.3. Características dos componentes da envoltória nos dois casos.

	M_01			M_01 com MCE-02		
	material	m	W/(m <sup>2</sup> K)	material	m	W/(m <sup>2</sup> K)
<b>Cobertura</b>	telha de barro	0,01	5,079	telha de barro	0,01	0,349
	forro de PVC	0,01		isolante lã de vidro	0,05	
				câmara de ar	0,40	
				forro de PVC	0,01	
<b>Parede</b>	reboco	0,02	1,845	reboco	0,02	0,300
	tijolo furado	0,09		tijolo furado	0,09	
	reboco	0,02		isolante lã de vidro	0,05	
				tijolo furado	0,09	
				reboco	0,02	

Em regiões com clima quente, uma envolvente muito isolada pode dificultar o processo físico por condução, que é encarregado de criar um fluxo de calor para o exterior no período noturno. Portanto, o material isolante é aplicado unicamente em duas das superfícies, que recebem a maior quantidade de irradiação (Figura 2.16), facilitando o processo de esfriamento noturno pelas superfícies restantes.

Para avaliação das temperaturas operativas e as temperaturas internas das superfícies que recebem o material isolante, comparando antes e depois, são selecionadas as zonas Z04 e Z11 porque estão localizadas nos extremos da edificação. A Figura 3.21 e Figura 3.22 mostram as temperaturas operativas das Z04 e Z11, respectivamente. A Figura 3.23 e a Figura 3.24 mostram os valores comparados das temperaturas da superfície interna da parede nas Z04 e Z11 antes e depois da instalação da MCE. Já a Figura 3.25 e a Figura 3.26 mostram o comportamento das superfícies internas antes e depois da MCE, nas Z04 e Z11. Os dados são referentes aos dias 21 de fevereiro e 21 de novembro.

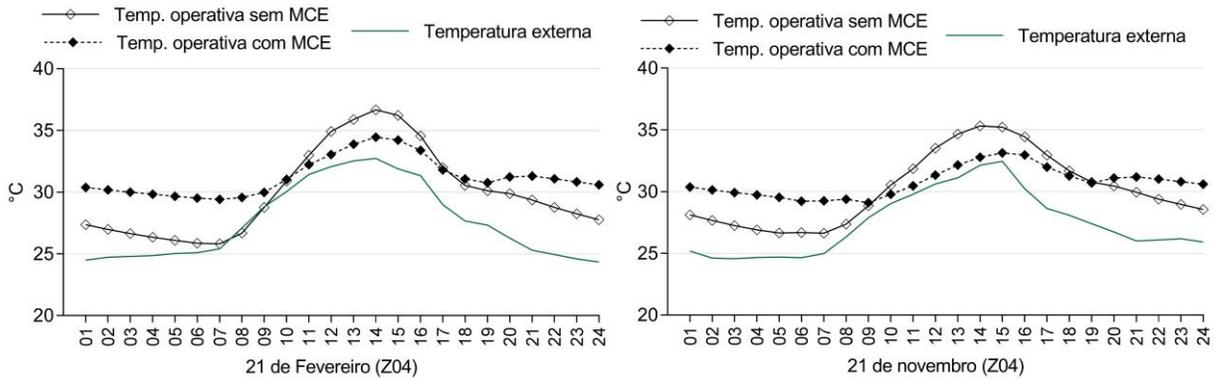


Figura 3.21. Comparação de temperatura operativa na zona Z04 nos dias 21/02 e 21/11.

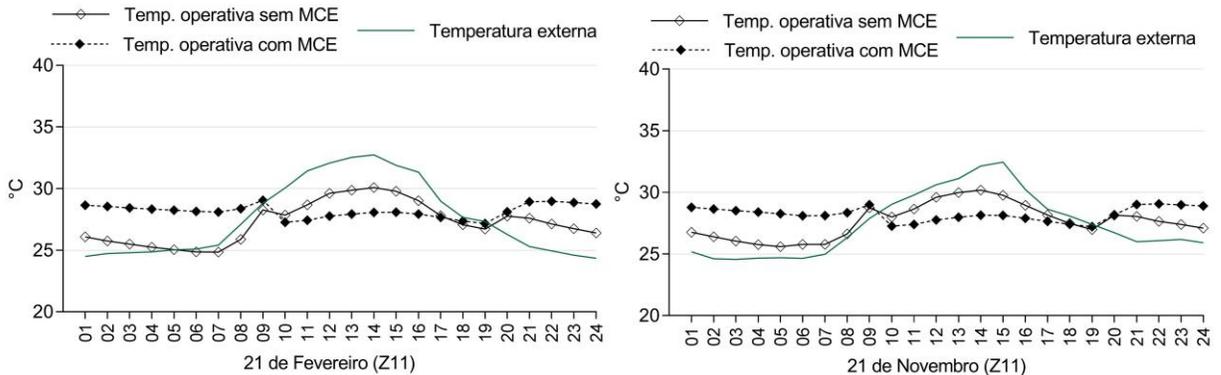


Figura 3.22. Comparação de temperatura operativa da zona Z11 nos dias 21/02 e 21/11.

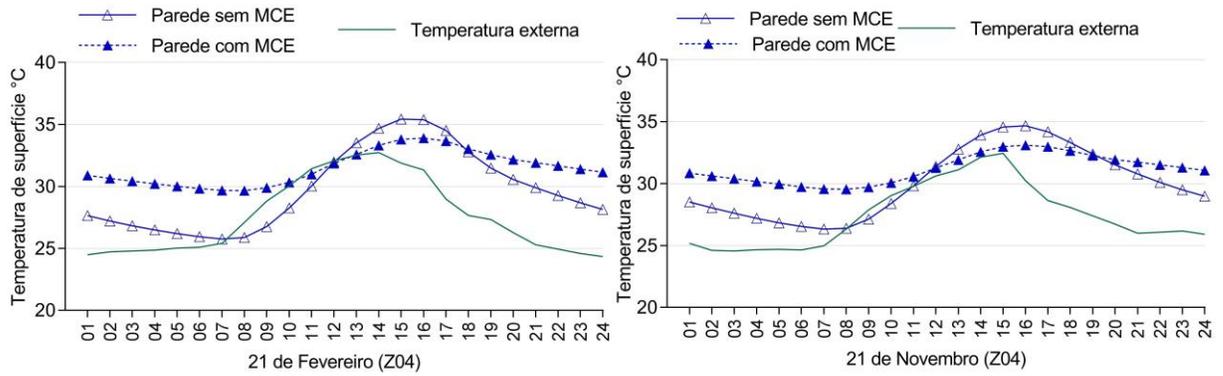


Figura 3.23. Comparação de temperatura de superfície interna da parede na zona Z04 nos dias 21/02 e 21/11.

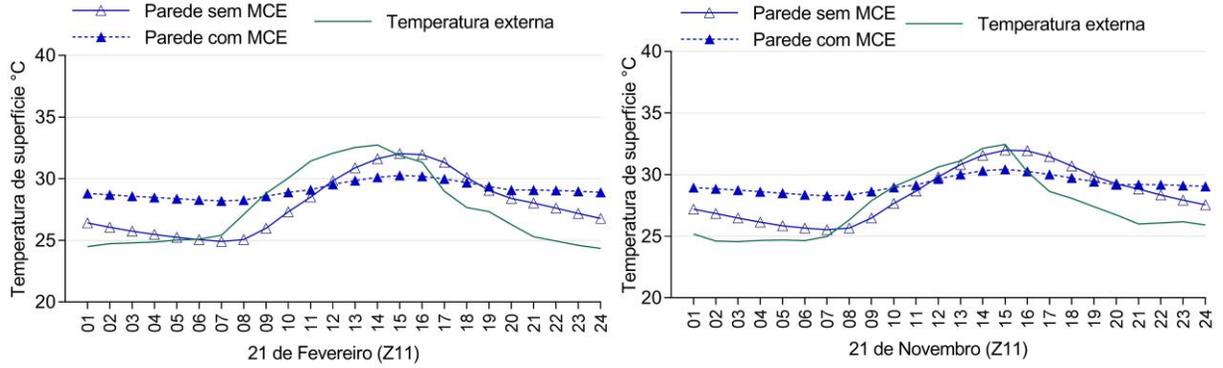


Figura 3.24. Comparação de temperatura de superfície da parede na zona Z11 nos dias 21/02 e 21/11.

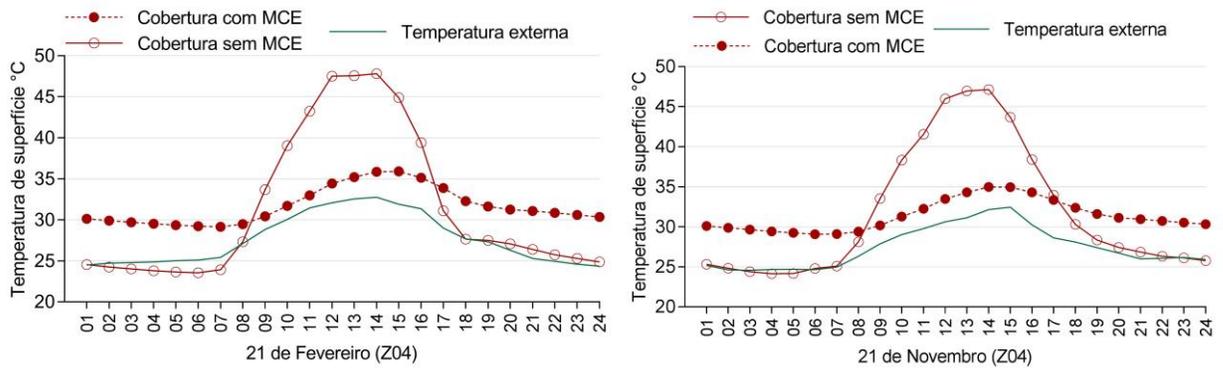


Figura 3.25. Comparação de temperatura de superfície interna da cobertura na zona Z04 nos dias 21/02 e 21/11.

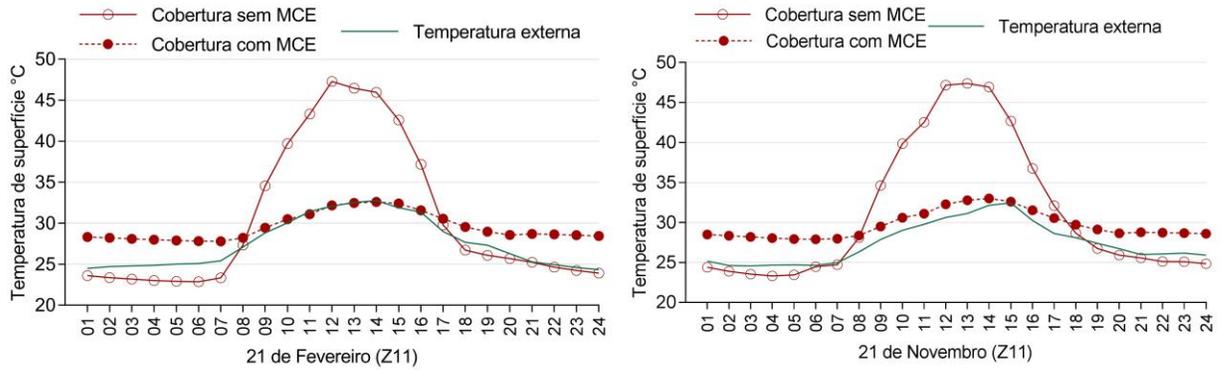


Figura 3.26. Temperatura de superfície interna da cobertura da zona Z11 nos dias 21/02 e 21/11.

A Z04 não possui nenhum sistema de condicionamento de ar, pelo que a temperatura operativa interna é sempre superior à temperatura externa. Entretanto, percebe-se que após a instalação do isolante térmico na cobertura e na parede leste, a temperatura operativa máxima diminui, o que facilitaria alcançar as condições de conforto com equipamentos de climatização do ar de menor potência. Já a Z11 possui um sistema de condicionamento de ar tipo *Split*. Com base nos dados obtidos, percebe-se a possibilidade de economia no sistema de condicionamento de ar.

O material isolante corrige as pontes térmicas, conferindo uma maior inercia térmica à cobertura, o que contribui para manter a temperatura de sua superfície interna praticamente estável no horário de maior insolação e até o final do dia. Percebe-se um atraso térmico de 2 a 3 horas em relação aos picos de temperatura de superfícies interna e externa, e uma diferença com a temperatura máxima da superfície externa superior a 12 °C nas zonas analisadas.

As vantagens associadas à aplicação de isolante térmico não se percebem unicamente nas trocas de calor da envoltória, mostrando-se de grande importância nas variações de energia térmica nos espaços internos. A Figura 3.27 apresenta as cargas térmicas de pico que devem ser retiradas pelos sistemas de condicionamento de ar em todas as zonas, antes e depois da aplicação dos materiais isolantes.

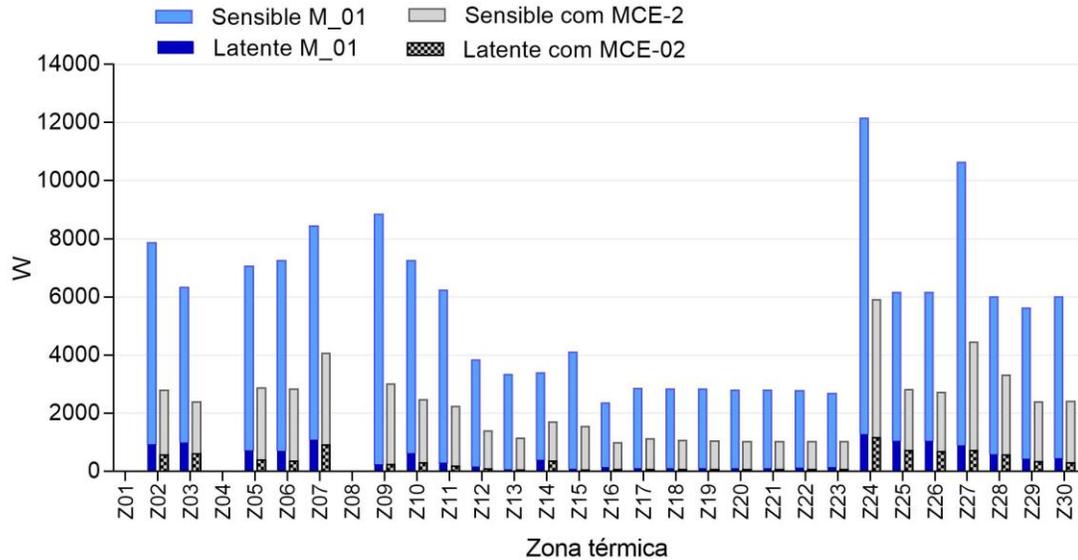


Figura 3.27. Cargas térmicas máximas (sensível e latente) para resfriamento.

Os picos de valor máximo de cargas sensíveis e latentes em cada zona mudam notoriamente após a aplicação do isolante térmico e da câmara de ar. Isto implica na diminuição da potência dos equipamentos para condicionamento de ar e na consequente diminuição do consumo de energia elétrica.

A Figura 3.28 mostra a carga térmica total mensal acumulada da edificação e a comparação entre os dois modelos, antes e depois da instalação dos isolantes térmicos e da câmara de ar. Os modelos apresentam diferenças de 13 % no mês de fevereiro e 30 % nos meses de agosto e setembro.

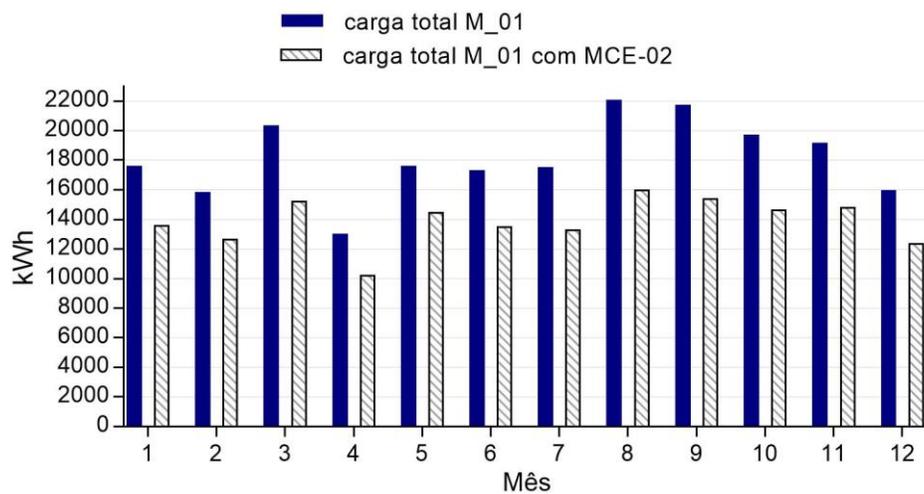


Figura 3.28. Cargas térmicas totais mensais para resfriamento.

### 3.2.2.2 Economia com energia elétrica

Os sistemas de condicionamento de ar são de expansão direta, tipo *Split*, sendo instalado um aparelho em cada zona térmica, com controle manual. Com as rotinas de ocupação e uso já especificadas, é calculado o consumo de energia elétrica para condicionamento de ar no modelo base, e posterior à aplicação da MCE-02 de isolamento térmico e câmara de ar. A Figura 3.29 mostra o consumo de energia elétrica em HVAC para todo o edifício nos dias 21/02 e 21/11, denominados dias de projeto, e a Figura 3.30 mostra o consumo mensal em condicionamento de ar, em ambos os modelos.

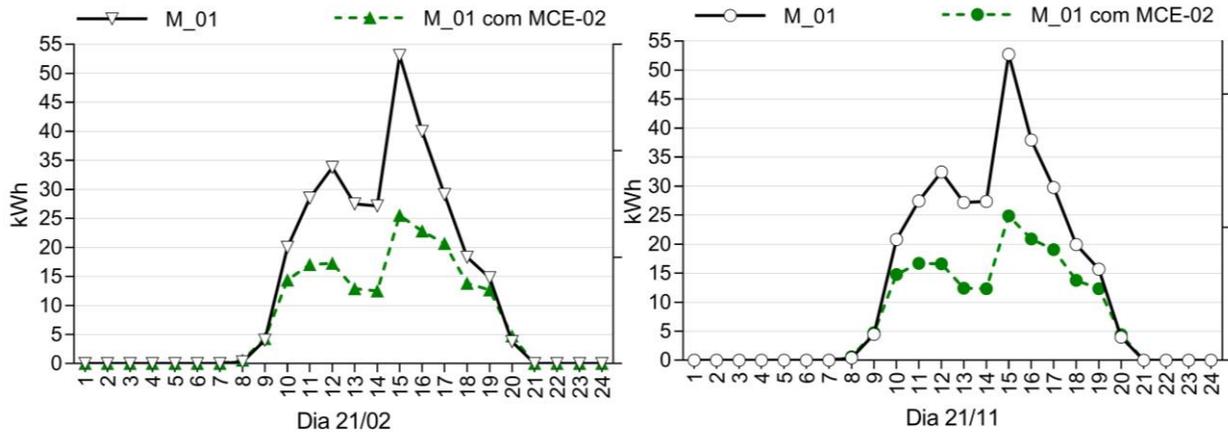


Figura 3.29. Consumo de energia em condicionamento de ar nos DDY.

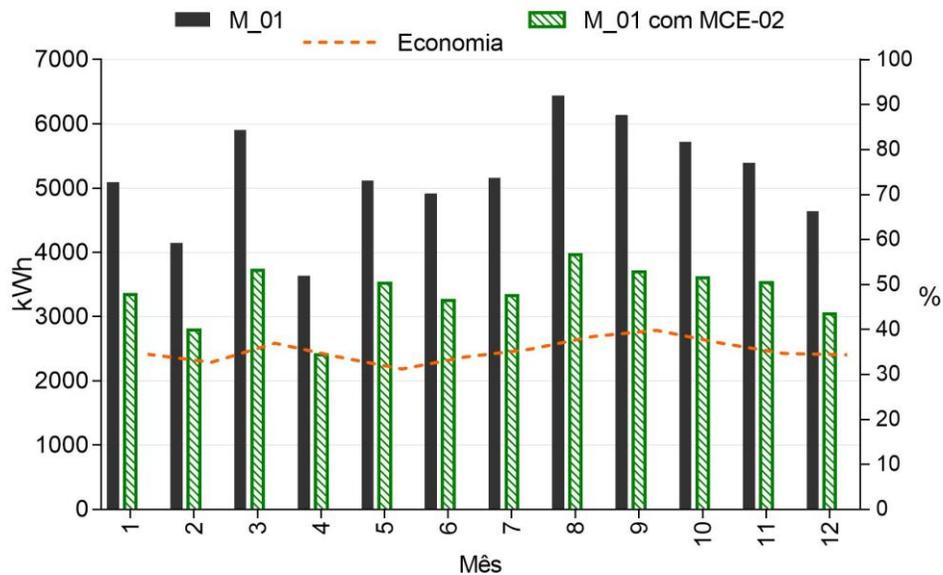


Figura 3.30. Consumo mensal em condicionamento de ar antes e depois da MCE-02.

Percebe-se uma diminuição do consumo de energia elétrica para condicionamento de ar, do M\_01, após a aplicação dos isolantes térmico e câmara de ar. As diferenças de consumo de energia ativa para resfriamento alcança o valor máximo de 40 % no mês de setembro, e no mês de fevereiro alcança uma economia de 33 % com relação ao consumo de energia para resfriamento de ar. Entre os modelos antes e depois da MCE observa-se uma diferença de até 22.119 kWh/ano, equivalente a 35,52 % do consumo total para condicionamento de ar.

### **3.2.3 MCE-03 - Iluminação Natural e Isolamento Térmico**

O uso racional de energia em edificações e a redução do seu consumo e seus sistemas, pode ser mais eficiente quando são usadas em conjunto medidas de conservação de energia, que comprovadamente exercem uma clara influência e contribuem de maneira significativa, tanto para a economia energética e monetária final, quanto para o bem-estar e conforto dos usuários.

As medidas analisadas individualmente nos itens anteriores são aplicadas em conjunto para avaliar o desempenho da edificação como um todo em termos de consumo de energia e impacto nos usos finais. Assim, no modelo base (M\_01) são aplicadas:

- Estratégias para aproveitamento da iluminação natural - MCE-01. Janelas amplas, balancins, lanternins e iluminação zenital nas circulações (Figura 3.14) e;
- Estratégias para diminuição da carga térmica - MCE-02. Manta isolante térmica na cobertura e câmara de ar, e painel isolante nas paredes leste e oeste (Figura 3.20).

#### **3.2.3.1 Economia com energia elétrica**

A edificação apresenta diferenças de consumo quando aplicadas as duas medidas em conjunto. A Figura 3.31 mostra os valores correspondentes às diferenças entre o modelo base e o modelo com ambas as medidas.

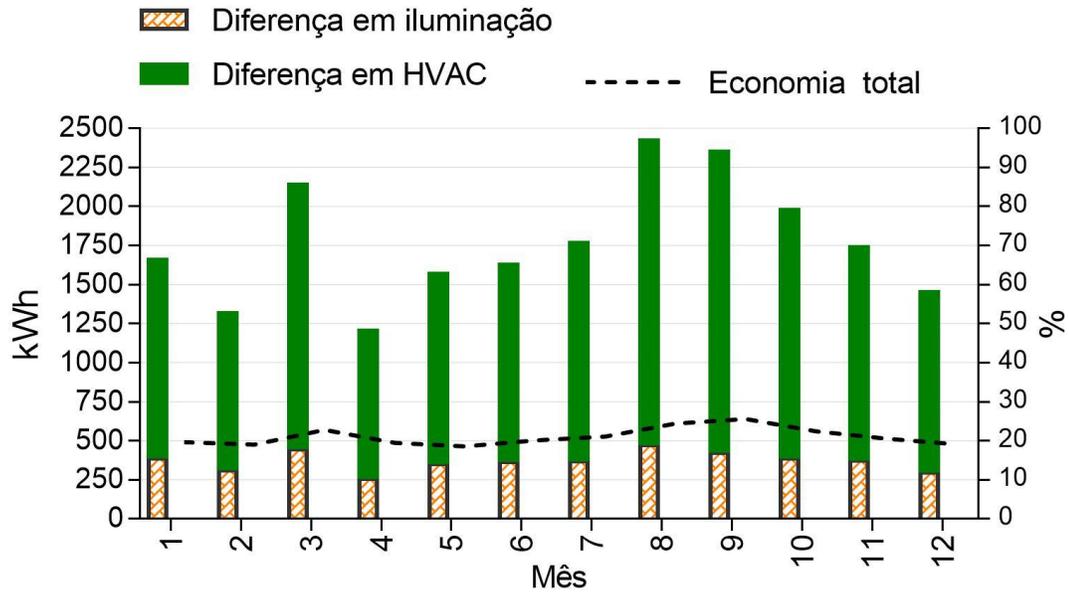


Figura 3.31. Diferenças de consumo com as medidas aplicadas.

Realizadas as simulações correspondentes, percebe-se que quando instalada a iluminação zenital nas circulações internas, há leve aumento na carga térmica nas zonas anexas. Assim, encontra-se que a diferença total demonstrada na MCE-03 não é equivalente à soma das medidas já especificadas individualmente.

No total, a diferença no consumo anual acumulado corresponde a 21 % de economia com as duas medidas em conjunto, alcançando um valor de 21.230 kWh/ano.

### 3.2.4 MCE-04 - Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede

Em uma edificação eficiente com um adequado desempenho energético é fundamental que, além da eficiência na sua envoltória e sistemas, exista também na sua estrutura um sistema de produção de energia a partir de fontes renováveis. Neste item são descritos os sistemas utilizados e avaliado o seus impactos nas cargas da edificação.

#### 3.2.4.1 SFCR instalados no Laboratório

O Laboratório possui uma área externa denominada “área de teste”, na qual são instalados sistemas fotovoltaicos para geração de energia elétrica. São SFCR que contribuem diretamente para atendimento das cargas do prédio e são usados tanto para fins acadêmicos quanto para atender

parte da demanda. A Figura 3.32 mostra uma vista aérea da área do Laboratório com todos os sistemas instalados, e a Tabela 3.4 apresenta a capacidade de cada sistema.



Figura 3.32. Vista aérea da área externa do Laboratório. Fonte: Adaptada do GoogleEarth.

Tabela 3.4. SFCR instalados no Laboratório.

SFCR	Nº módulos	kWp	Inversor (W)
S01	21	1,68	1.200
S02	28	3,36	2.800
S03	6	1,47	1.200
S04	10	1,21	1.200
S05	12	3,18	2.200
S06	1	0,24	270
S07	8	1,92	1.500
S08	10	2,45	3.000
S09	10	2,5	*2 (1.200)
S10	4	1,0	*4 (270)
S11	10	1,0	1.200

É importante salientar que neste estudo não são avaliados todos os sistemas fotovoltaicos instalados, devido a que alguns compõem o sistema híbrido que atende também a edificação, são parte de um sistema isolado (SIGFI), ou não contribuem energeticamente. O sistema híbrido embora não fazendo parte deste escopo, é um sistema que tem uma contribuição importante na edificação, e SIGFI é o sistema isolado mais representativo, projetado para atendimento de pequenas demandas. Estes sistemas são descritos nos subitens 3.3.4.1 e 3.3.4.2.

#### 3.2.4.2 Medições e monitoração dos SFCR

Os SFCR são monitorados em grandezas elétricas dos geradores e dos inversores, servindo como pesquisa para o desenvolvimento de diversos trabalhos acadêmicos de pesquisadores participantes do laboratório (MACÊDO et al., 2010), (CAVALCANTE, 2011), (MANITO, 2012), (JUNIOR, 2017), (RODRIGUES, 2017), (TELES, 2017), entre outros. Os dados medidos, utilizados para validação da simulação dos SFCR, fazem parte dessas pesquisas.

Para todos os sistemas, são coletados dados das variáveis climáticas e ambientais o mais próximo possível e que influem diretamente nos sistemas. A calibração dos modelos dos SFCR é feita tendo como base os dados medidos, e são especificados da seguinte forma: para os sistemas S01 e S02 as medições usadas foram realizadas durante o ano de 2013, ano de início de funcionamento; e para os sistemas S03 a S08 são usadas medições obtidas no ano de 2016. Para uma melhor aproximação dos dados simulados aos dados medidos, é modificado o arquivo climático em formato “EPW”, onde são inseridos os dados climáticos de temperatura de bulbo seco, irradiação direta, difusa e global no plano horizontal dos anos mencionados. Os dados inseridos são registrados pela estação meteorológica instalada na área de teste da edificação.

### 3.2.4.3 Simulações computacionais para avaliação da MCE-04

O programa EnergyPlus disponibiliza modelos de geradores que podem ser empregados nas simulações do sistema solar fotovoltaico. O programa exige dados completos das características dos módulos fotovoltaicos e inversores, assim como detalhes da configuração dos módulos, indicando o número de módulos em série e o número de *strings* em paralelo. O programa oferece três algoritmos matemáticos diferentes para o cálculo da eletricidade produzida por um gerador fotovoltaico. Os algoritmos utilizam três modelos:

- O modelo simples: é o mais simplificado para previsão de produção de energia fotovoltaica, que pode ser útil para a fase inicial de projeto, possuindo menos dados de entrada, apenas a eficiência com qual o módulo converte radiação solar incidente em eletricidade, e não se precisa especificar (ou determinar) os coeficientes de desempenho detalhados de um módulo FV particular (ENERGYPLUS, 2011).

- O modelo equivalente de um diodo: necessita de diversos dados que constam nos manuais técnicos dos módulos, como corrente de curto-circuito, corrente de máxima potência, tensão de circuito aberto, coeficientes de temperatura e outros. É necessário descrever as características de desempenho dos módulos fotovoltaicos a serem modelados usando um circuito equivalente de um diodo.

- O modelo da *Sandia National Laboratories*: é o terceiro modelo disponível no EnergyPlus e é baseado em pesquisas do *Sandia National Laboratory*. O modelo consiste em uma série de relações empíricas com coeficientes que são derivados de medições reais e ensaios experimentais (ENERGYPLUS, 2011); diversos deles estão disponíveis na base de dados do EnergyPlus.

Para avaliar os sistemas de geração fotovoltaica neste estudo é usado o módulo modelo de um diodo equivalente (*Equivalent one diode*) para simulação dos sistemas instalados, por favorecer uma aproximação mais real dos dados dos módulos específicos já instalados.

### 3.2.4.4 Análise dos Sistemas e validação de dados

#### Sistema 01 - S01

O S01 é composto por geradores fotovoltaicos instalados no beiral, classificado como BIPV por fazer parte integrante da edificação, e é composto por 21 módulos fotovoltaicos policristalinos conectados em série, com área total de 23,05 m<sup>2</sup> totalizando 1,68 kWp. As especificações técnicas do módulo KC80 são mostradas na Tabela 3.5.

O inversor utilizado no S01 é o Sunny Boy 1200 do fabricante SMA, com tensão nominal de entrada de 120 Vcc e tensão nominal de saída de 240 Vca, com frequência de 60 Hz, potência nominal de saída de 1.200 W e um grau máximo de rendimento de 92,1 %. A

Tabela 3.6 mostra os dados do inversor usado neste sistema.

Tabela 3.5. Especificações técnicas do módulo FV utilizado no S01.

<b>Especificações técnicas do módulo</b>	<b>KC80</b>
Potência de pico	80 W
Tensão de máxima potência	16,9 V
Corrente de máxima potência	4,73 A
Tensão de circuito aberto	21,5 V
Corrente de curto-circuito	4,97 A
Coeficiente de temperatura de corrente	4,05 mA/°C
Coeficiente de temperatura de tensão	-82,4 mV/°C
Temperatura nominal de operação da célula	47 °C
Células por módulo	36

Tabela 3.6. Especificações técnicas do inversor utilizado no S01.

<b>Especificações do inversor</b>	<b>Sunny Boy 1200</b>
Potência nominal c.c.	1.320 W
Máxima tensão c.c.	400 V
Faixa de operação do SPMP	100 V - 320 V
Corrente máxima c.c.	12,6 A
Potência máxima c.a.	1.200 W
Tensão de operação c.a.	180 V - 265 V
Corrente máxima c.a.	6,1 A
Frequência	50/60 Hz +/- 4,5 Hz
Máxima eficiência	92,1 %

As medições de energia produzida pelo S01, utilizadas para comparação com os dados simulados, foram realizadas no ano de 2013, quando iniciou o funcionamento, não existindo atualmente medições disponíveis para outros anos. A produção mensal de energia elétrica ativa do S01 é mostrada na Figura 3.33. Comparando com os dados simulados no mesmo período, obtém-se um CV (RMSE) de 5,27 % e um erro médio (MBE) de 4,46 %.

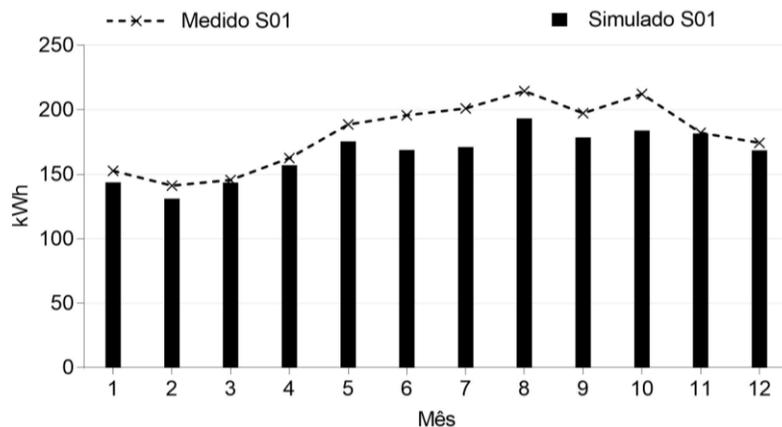


Figura 3.33. Energia elétrica ativa produzida pelo S01 comparada com os dados simulados.

## Sistema 02 - S02

Com geradores fotovoltaicos instalados na cobertura, é um sistema BAPV de cobertura ventilada. Trata-se de um sistema adaptado sobre a cobertura, fixado com estruturas metálicas, com uma câmara de ar que facilita a ventilação. O sistema ocupa parcialmente a cobertura, com uma área de 28,70 m<sup>2</sup>, composto por 28 módulos fotovoltaicos policristalinos KC120 em série, totalizando 3,36 kWp. As especificações técnicas do módulo KC120 são apresentadas na Tabela 3.7.

Para interligar o S02 à rede elétrica é utilizado um inversor Xantrex de 2,8 kW, modelo GT2.8-NA-240/208 UL-05, cujas especificações podem ser vistas na Tabela 3.8.

Tabela 3.7. Especificações técnicas do módulo FV utilizado no S02.

<b>Especificações técnicas do módulo</b>	<b>KC120</b>
Potência de pico	120 W
Tensão de máxima potência	16,9 V
Corrente de máxima potência	7,1 A
Tensão de circuito aberto	21,5 V
Corrente de curto-circuito	7,45 A
Coefficiente de temperatura de corrente	6,08 mA/°C
Coefficiente de temperatura de tensão	-82,4 mV/°C
Temperatura nominal de operação da célula	47 °C
Células por módulo	36

Tabela 3.8. Especificações técnicas do inversor utilizado no S02.

<b>Especificações do inversor</b>	<b>Xantrex</b>
Potência nominal c.c.	3.700 W
Máxima tensão c.c.	600 V
Faixa de operação do SPMP	195 V - 550 V
Corrente máxima c.c.	24 A
Potência máxima c.a.	2.800 W
Tensão de operação c.a.	240 V
Frequência	59,3 / 60,5 Hz
Máxima eficiência	95 %

Ao comparar a produção mensal de energia elétrica ativa medida para o ano de 2013, produzida pelo S02 com os dados simulados no mesmo ano para validação, obtém-se um CV (RMSE) de 5,17 % e um erro médio (MBE) de 2,81 %. A Figura 3.34 mostra a comparação entre os dados mensais medidos de energia elétrica produzida pelo sistema e os dados no mesmo período, obtidos dos resultados gerados na simulação.

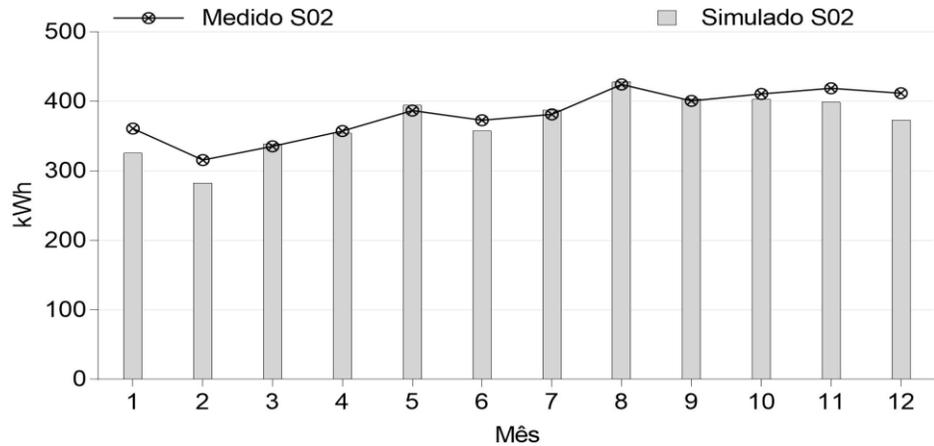


Figura 3.34. Energia elétrica ativa produzida pelo S02, comparado com os dados simulados.

### Sistema 03 - S03

O módulo fotovoltaico utilizado para compor o gerador fotovoltaico do sistema S03 é o modelo YL245P-29b da fabricante YINGLI SOLAR, com potência nominal de 245 Wp e composto por 60 células de silício policristalino. O gerador é formado por 6 módulos, totalizando 1,47 kWp instalados. As características técnicas do módulo são apresentadas na Tabela 3.9.

O inversor utilizado no S03 é o Sunny Boy 1200, e suas características técnicas estão especificadas na Tabela 3.6.

Tabela 3.9. Características do módulo usado no S03.

Especificações do módulo	YL245P
Potência de pico(Pmáx)	245 Wp
Tensão de máxima potência (Vmáx)	30,2 V
Corrente de máxima potência (Imáx)	8,11 A
Tensão de circuito aberto (Voc)	37,8 V
Corrente de curto-circuito (Isc)	8,63 A
Eficiência do módulo ( $\eta$ )	15 %

Para validação da simulação do S03, é avaliada a produção diária do mês de março e comparada com os dados medidos no mesmo período. Ao realizar a comparação, obteve-se um CV (RMSE) de 8,21 % e um erro médio (MBE) de -0,46 %. A energia elétrica produzida pelo S03 e simulada durante o mês de março é mostrada na Figura 3.35.

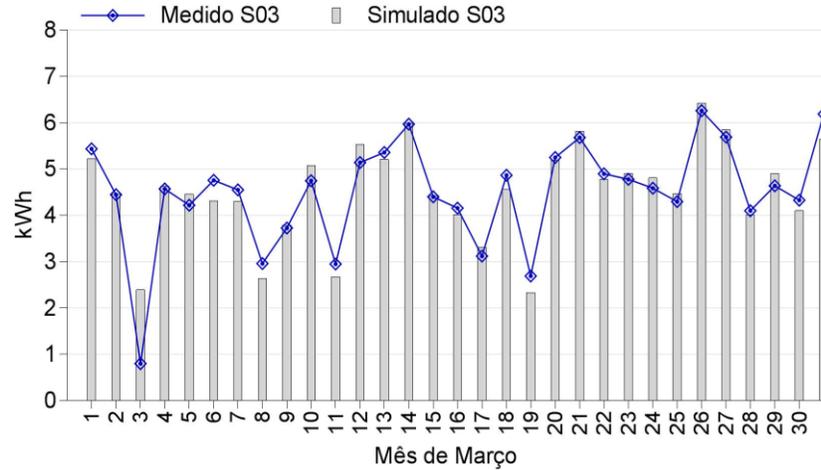


Figura 3.35. Energia elétrica ativa produzida pelo S03, comparada com os dados simulados.

#### Sistema 04 - S04

O gerador fotovoltaico é composto por dez módulos fotovoltaicos de filme fino do fabricante DuPont Apollo, modelo DA121-C1, que estão divididos em cinco *strings* com dois módulos fotovoltaicos cada uma, e todas conectadas em paralelo. Isto é necessário para adequar os níveis de tensão e corrente à entrada do inversor, uma vez que este módulo, na sua máxima potência, gera uma corrente da ordem de 1 A e uma tensão de aproximadamente 121 V, totalizando uma potência máxima de 121 W (TELES, 2017). As características do módulo DA121-C1 são mostradas na Tabela 3.10.

O inversor instalado no S04 é o Sunny Boy 1200 do fabricante SMA e suas características encontram-se descritas na Tabela 3.6.

Tabela 3.10. Características do módulo usado no S04.

Especificações do módulo	DA121-C1
Potência de pico(P <sub>máx</sub> )	121 Wp
Tensão de máxima potência (V <sub>máx</sub> )	120,6 V
Corrente de máxima potência (I <sub>máx</sub> )	0,99 A
Tensão de circuito aberto (V <sub>oc</sub> )	146,6 V
Corrente de curto-circuito (I <sub>sc</sub> )	1,2 A
Eficiência do módulo ( $\eta$ )	7,6 %

O S04 é monitorado por TELES (2017), onde para medição da energia produzida é usado um medidor SMT 1510. Realizada a comparação das leituras obtidas nos *displays* dos medidores e inversores dos sistemas que possuem o mesmo modelo de inversor, verificou-se que estas estão

bastante coerentes, com variações somente na segunda casa decimal. As medições realizadas dos meses de março a dezembro são utilizadas para validação da simulação do S04. A Figura 3.36 mostra os dados medidos para 10 meses do ano e simulados para o mesmo período, obtendo-se um CV (RMSE) de 7,75 % e um erro médio (MBE) de 1,73 %.

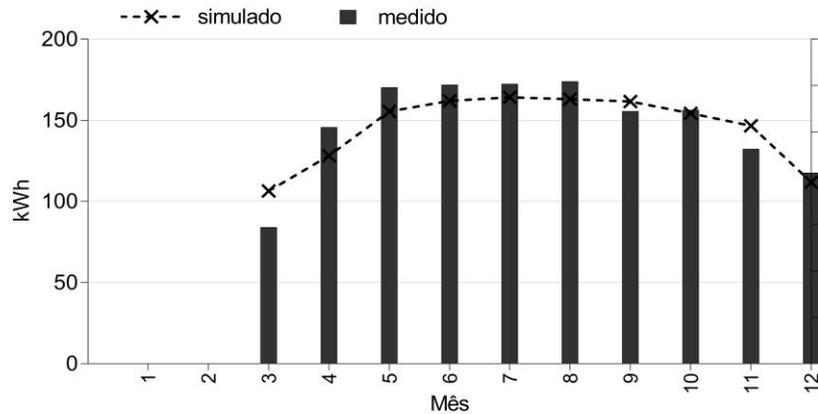


Figura 3.36. Energia elétrica ativa produzida pelo S04, comparada com os dados simulados.

### Sistema 05 - S05

O módulo fotovoltaico utilizado para compor o S05 é o modelo JAP6-60-265/3BB do fabricante JASolar, com potência nominal de 265 Wp, o qual possui 60 células de silício policristalino e uma eficiência nominal de 16,21 %. O gerador é formado por 12 módulos FV, totalizando 3,18 kWp instalados. A Tabela 3.11 mostra as especificações do módulo utilizado no S05. A cada módulo está conectado um conversor c.c.-c.c. de modelo P350 do fabricante SolarEdge, que suporta módulos FV de até 350 W e possui uma eficiência máxima de 99,5 %.

O inversor utilizado no S05 é o SE2200, do mesmo fabricante do conversor c.c.- c.c, com tensão nominal de entrada de 350 Vcc e tensão nominal de saída de 220/230 Vca, com frequência de 50/60 +/- 5 Hz, potência nominal de saída de 2.200 W e uma eficiência nominal de 97,6 %. As suas especificações são mostradas na Tabela 3.12.

Tabela 3.11. Características do módulo usado no S05.

Especificações do módulo	JAP6-265
Potência de pico (P <sub>máx</sub> )	265 Wp
Tensão de máxima potência (V <sub>máx</sub> )	30,96 V
Corrente de máxima potência (I <sub>máx</sub> )	8,56 A
Tensão de circuito aberto (V <sub>oc</sub> )	38,14 V
Corrente de curto-circuito (I <sub>sc</sub> )	9,10 A
Eficiência do módulo ( $\eta$ )	16.21 %

Tabela 3.12. Especificações técnicas do inversor utilizado no S05.

<b>Especificações do inversor</b>	<b>SE2200</b>
Potência nominal c.c.	2.750 W
Máxima tensão c.c.	500 V
Corrente máxima c.c.	11,5 A
Potência máxima c.a.	2.200 W
Tensão de operação c.a.	185 V - 264.5 V
Corrente máxima c.a.	12 A
Frequência	50/60 Hz +/- 5 Hz
Máxima eficiência	97,6 %

A aquisição de dados é realizada por um equipamento do mesmo fabricante do inversor, denominado de *SEgateway*, que além de guardar os parâmetros elétricos e ambientais do sistema em servidor *online* do próprio fabricante, serve também para controlar remotamente alguns parâmetros do inversor (TELES, 2017).

A Figura 3.37 mostra a produção mensal de energia elétrica ativa do S05, comparando com os dados gerados dos relatórios de saída da simulação do sistema, obtendo um CV (RMSE) de 16,63 % e um erro médio (MEB) de 10,60 %.

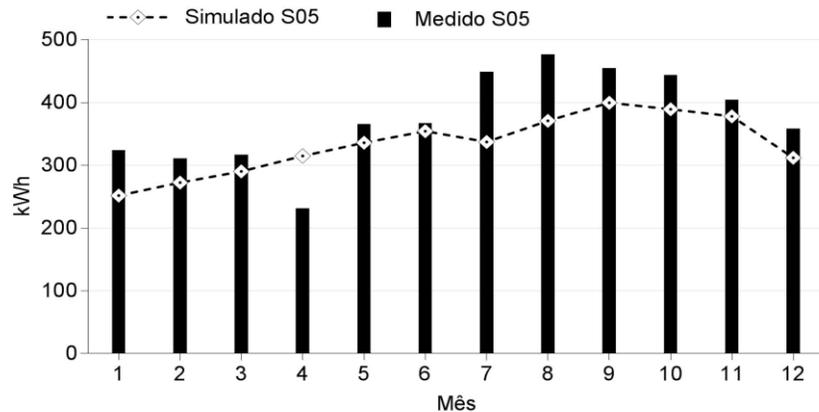


Figura 3.37. Energia elétrica ativa produzida pelo S05 comparada com os dados simulados.

O sistema S05 apresenta um erro quadrático maior, já que os dados medidos apresentam valores mais altos que os dados gerados da simulação de produção do sistema. Isto se deve a possíveis erros do sistema de medição do inversor, que ocasionalmente apresentava valores superiores à sua potência nominal (2.200 W) durante as medições realizadas para o ano de 2016. A atualização de *firmware* foi realizada em março de 2017.

### Sistema 06 - S06

O S06 é composto por um único módulo fotovoltaico modelo S19G245 do fabricante ALEO SOLAR, com potência nominal de 245 Wp e composto por 60 células de silício monocristalino. As especificações do módulo S19G245 estão mostradas na Tabela 3.13.

Para conversão de energia c.c. para c.a. utiliza-se um microinversor modelo Enphase M215, com tensão máxima de entrada de 48 Vcc e tensão nominal de saída de 208 Vca, com frequência de 60 Hz, potência nominal de saída de 215 W, e um rendimento máximo de 96,5 %, e suas características técnicas são apresentadas na Tabela 3.14.

Tabela 3.13. Características do módulo usado no S06.

<b>Especificações do módulo</b>	<b>S19G245</b>
Potência de pico(P <sub>máx</sub> )	245 Wp
Tensão de máxima potência (V <sub>máx</sub> )	30.1 V
Corrente de máxima potência (I <sub>máx</sub> )	8,1 A
Tensão de circuito aberto (V <sub>oc</sub> )	37,4 V
Corrente de curto-circuito (I <sub>sc</sub> )	8,6 A
Eficiência do módulo ( $\eta$ )	14,9 %

Tabela 3.14. Especificações técnicas do inversor utilizado no S06.

<b>Especificações do Microinversor</b>	<b>M215</b>
Potência nominal c.c.	270 W
Máxima tensão c.c.	48 V
Faixa de operação do SPMP	27 V - 39 V
Corrente máxima c.c.	15 A
Potência máxima c.a.	225 W
Tensão de operação c.a.	183 V - 229 V
Corrente máxima c.a.	1,03 A
Frequência	57 - 61 Hz
Máxima eficiência	96,5 %

A Figura 3.38 mostra a comparação entre a produção mensal de energia elétrica ativa pelo S06 e os dados simulados, gerados para o mesmo período, obtendo um CV (RMSE) de 12,93 % e um erro médio (MBE) de 11,15 %.

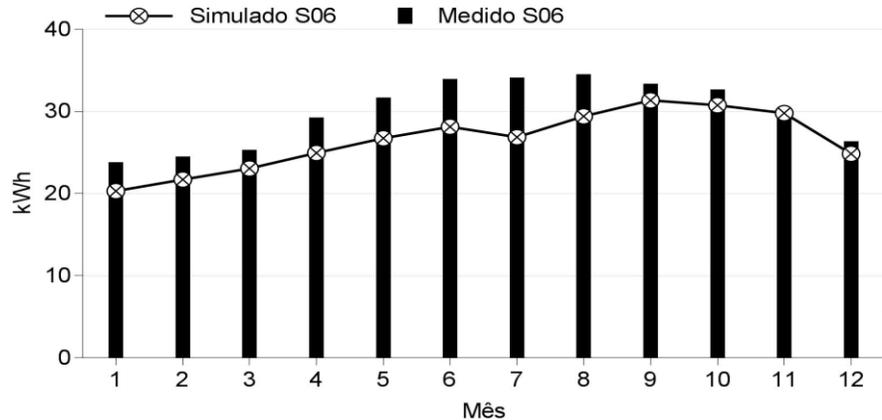


Figura 3.38. Energia elétrica ativa produzida pelo S06, comparada com os dados simulados.

### Sistema 07 - S07

O gerador fotovoltaico do S07 consta de sete módulos de 240 W conectados em série, formando apenas um *string* com 1.680 Wp. Cada módulo é constituído de 60 células de silício monocristalino e é fabricado pela ALEO SOLAR. O sistema também inclui um módulo de 245 W do fabricante YINGLI SOLAR, inserido no sistema por possuir características semelhantes aos já instalados, e necessário para aumentar a potência de pico para 1.925 Wp. A Tabela 3.15 apresenta as características dos módulos usados no S07.

Neste sistema é utilizado um inversor de potência de 1.500 W fabricado pela FRONIUS, modelo GALVO 1.5-1, com tensão máxima de entrada igual a 420 Vcc e tensão nominal de saída de 230 Vca, frequência de 50 Hz/60 Hz, potência nominal de saída de 1.500 W e máxima eficiência de 95,9 %. As especificações do inversor são apresentadas na Tabela 3.16.

Tabela 3.15. Características dos módulos usados no S07.

Especificações dos módulos	S19-240	YL245b-29b
Potência de pico (P <sub>máx</sub> )	240 W	245 W
Tensão de máxima potência (V <sub>máx</sub> )	30,08 V	29,5 V
Corrente de máxima potência (I <sub>máx</sub> )	7,8 A	8,14 A
Tensão de circuito aberto (V <sub>oc</sub> )	36,9 V	37,8 V
Corrente de curto-circuito (I <sub>sc</sub> )	8,47 A	8,63 A
Eficiência do módulo ( $\eta$ )	14,6 %	15 %

Tabela 3.16. Especificações técnicas do inversor da FRONIUS utilizado no S07.

<b>Especificações do inversor</b>	<b>GALVO 1.5-1</b>
Potência nominal c.c.	3.000 W
Máxima tensão c.c.	420 V
Faixa de operação do SPMP	120 V - 335 V
Corrente máxima c.c.	13,3 A
Potência máxima c.a.	1.500 W
Tensão de operação c.a.	230 V
Corrente máxima c.a.	6,5 A
Frequência	50 - 60 Hz
Máxima eficiência	95,9 %

As medições de produção do sistema S07 foram realizadas durante os meses de maio a dezembro de 2016, e as simulações realizadas para o mesmo período, para fins de comparação. A Figura 3.39 mostra a comparação entre os dados medidos e os dados simulados para este período, notando-se que os valores são bem próximos, dando como resultado um CV (RMSE) de 7,25 % e um erro médio (MBE) de -0,42 %.

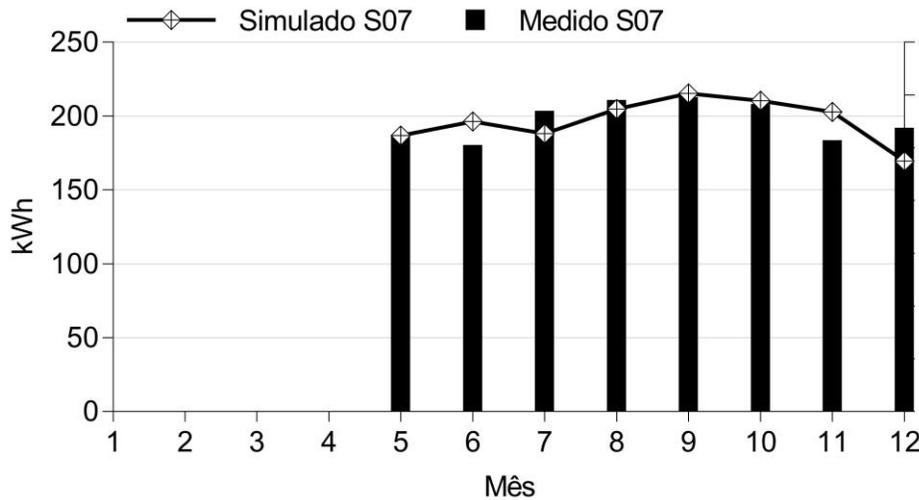


Figura 3.39. Energia elétrica ativa produzida pelo S07, comparada com os dados simulados.

### Sistema 08 - S08

O gerador fotovoltaico é formado por um *string* de 10 módulos de 245 W<sub>p</sub>, modelo SW245, do fabricante SOLAR WORLD, o qual possui 60 células de silício policristalino e uma eficiência nominal de 14,6 %. A Tabela 3.17 mostra as características do módulo utilizado no S08.

Neste sistema utiliza-se um inversor com potência nominal de 3 kW, do fabricante PHB, modelo PHB 3000-SS. A conexão do inversor com a rede elétrica e o gerador FV é realizada por

meio de um conjunto de dispositivos de proteção, que atuam tanto do lado c.c. quanto do lado c.a., comumente conhecido como *stringbox*. O modelo utilizado (também fornecido pela PHB) tem entrada para apenas um *string* e a saída que pode ser mono ou bifásica (F-N ou F-F 220V) (TELES, 2017). A Tabela 3.18 apresenta as características do inversor utilizado no S08.

Tabela 3.17. Características do módulo usado no S08.

<b>Especificações do módulo</b>	<b>SW245</b>
Potência de pico(P <sub>máx</sub> )	245 W <sub>p</sub>
Tensão de máxima potência (V <sub>máx</sub> )	30,8 V
Corrente de máxima potência (I <sub>máx</sub> )	7,96 A
Tensão de circuito aberto (V <sub>oc</sub> )	37,5 V
Corrente de curto-circuito (I <sub>sc</sub> )	8,49 A
Eficiência do módulo ( $\eta$ )	14,6 %

Tabela 3.18. Especificações técnicas do inversor PHB utilizado no S08.

<b>Especificações do inversor</b>	<b>PHB3000-SS</b>
Potência nominal c.c.	320 W
Máxima Tensão c.c.	500 V
Faixa de operação do SPMP	125 V - 450 V
Corrente Máxima c.c.	18 A
Potência máxima c.a.	3.000 W
Tensão de Operação c.a.	176 - 242 V
Corrente Máxima c.a.	15 A
Frequência	57,5 - 62 Hz
Máxima eficiência	97 %

Os dados medidos e simulados são analisados em períodos mensais durante um ano, obtendo-se um CV (RMSE) de 14,22 % e um erro médio (MBE) de 10,88 %. Esta comparação é mostrada na Figura 3.40, que apresenta a produção mensal de energia elétrica ativa produzida pelo S08 em comparação com os dados gerados na simulação.

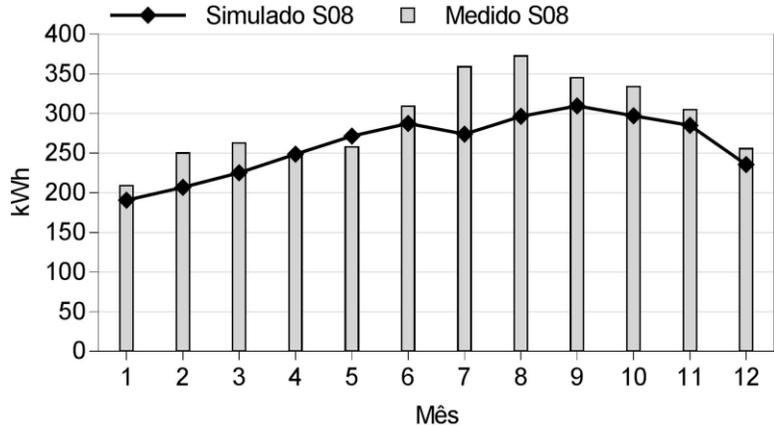


Figura 3.40. Energia elétrica ativa produzida pelo S08 comparada com os dados simulados.

### Sistema 09 - S09

Os dez módulos fotovoltaicos que compõem o S09 são do fabricante Kyocera, modelo KD250GH-4FB2. Estes módulos fazem parte de um gerador fotovoltaico de 14 kWp. Para possibilitar a operação com os dois inversores, os dez módulos foram subdivididos em duas *strings* de cinco, totalizando 1,25 kWp cada uma (RODRIGUES, 2017). A Tabela 3.19 mostra as informações técnicas do módulo.

O S09 é composto por dois inversores modelo Sunny Boy 1200, do fabricante SMA, com tensão nominal de entrada de 120 V em c.c. e tensão nominal de saída de 240 V em c.a., frequência de 60 Hz, potência nominal de saída de 1.200 W e eficiência de 92 %. As características dos inversores são mostradas na Tabela 3.6.

A Figura 3.41 mostra os dados de energia produzida pelo S09 obtidos pelo método de simulação do EnergyPlus.

Tabela 3.19. Características do módulo usado no S09.

Especificações do módulo	KD250GH-4FB2
Potência de pico(P <sub>máx</sub> )	250 Wp
Tensão de máxima potência (V <sub>máx</sub> )	29,8 V
Corrente de máxima potência (I <sub>máx</sub> )	8,39 A
Tensão de circuito aberto (V <sub>oc</sub> )	36,9 V
Corrente de curto-circuito (I <sub>sc</sub> )	9,09 A
Eficiência do módulo ( $\eta$ )	14 %

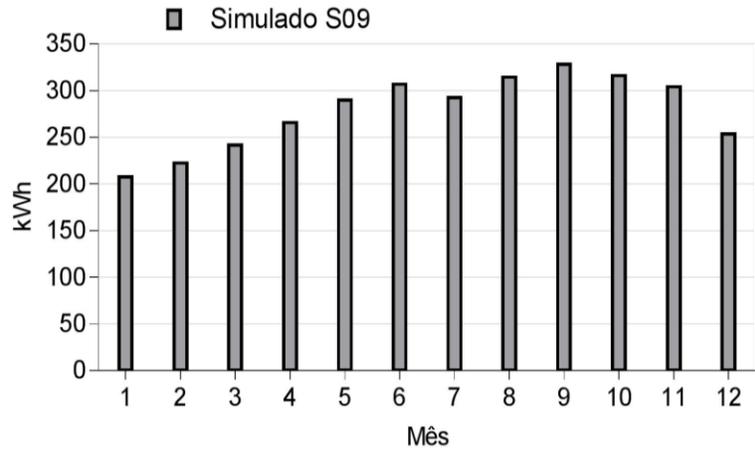


Figura 3.41. Energia elétrica gerada pelo S09 obtida por simulação.

Para os sistemas S09, S10 e S11 não é aferida a qualidade do ajuste aos modelos, devido à falta de medições para os anos de 2013 e 2016, anos que correspondem aos arquivos climáticos utilizados para a validação de todos os sistemas. No entanto, é calculada a produção de energia elétrica pelo método de simulação, seguindo os parâmetros já usados nos sistemas anteriores, conservando as características próprias de cada um.

### Sistema 10 - S10

O sistema S10 é composto por quatro módulos de silício policristalino, modelo KD250GH-4FB2 da Kyocera, individualmente conectados a quatro microinversores, configurando tipologia de inversor com módulo integrado. As especificações do módulo utilizado no S10 estão mostradas na Tabela 3.19. Este sistema está composto também por quatro microinversores do fabricante ENPHASE modelo M215-60-2LL-S22, e suas especificações técnicas estão mostradas na Tabela 3.14. A energia calculada pelo método de simulação, pelo sistema S10 é apresentada na Figura 3.42.

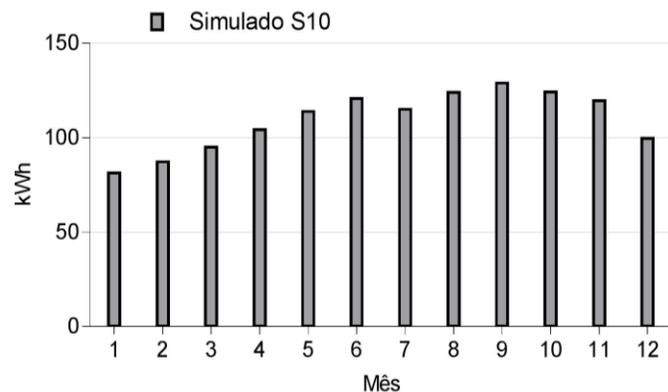


Figura 3.42. Energia elétrica produzida pelo S10 segundo o método de simulação.

### Sistema 11 - S11

O sistema S11 é composto por dez módulos fotovoltaicos de silício amorfo, modelo ASI-100P do fabricante SUNLAB, com potência de saída de 100 Wp e eficiência de 7 %, conectados todos em série. A Tabela 3.20 apresenta as características do módulo ASI-100P usado no S11.

O sistema é composto por um inversor da SMA modelo SUNNY BOY 1200, cujas características são apresentadas na Tabela 3.6. Os dados apresentados na Figura 3.43 são obtidos pelo método de simulação.

Tabela 3.20. Características do módulo usado no S11.

Especificações do módulo	ASI-100P
Potência de pico( $P_{m\acute{a}x}$ )	100 Wp
Tensão de máxima potência ( $V_{m\acute{a}x}$ )	17,5 V
Corrente de máxima potência ( $I_{m\acute{a}x}$ )	5,71 A
Eficiência do módulo ( $\eta$ )	7 %

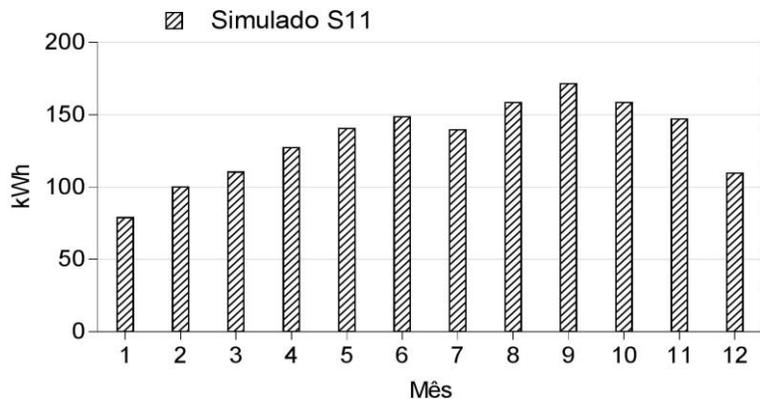


Figura 3.43. Energia elétrica simulada para o S11.

### 3.3 SFCR E PRODUÇÃO DE ENERGIA

A partir da simulação no programa EnergyPlus, é possível verificar que os sistemas em conjunto produzem uma energia anual total de 26.721,76 kWh. A geração mensal para cada sistema é mostrada na Figura 3.44, alcançando o conjunto dos sistemas uma maior geração no mês de setembro, de 2.513,49 kWh. O sistema que mais contribui com energia ativa produzida é o S02, com 4.446,26 kWh/ano.

Segundo o LABEEE (2015), a irradiância solar global no plano horizontal na cidade de Belém apresenta um máximo de 873,44 W/m<sup>2</sup>, para as 12 h do dia 27/11, considerando-se uma média de dez anos (2000 a 2010), com uma frequência acima de 15 % superior a 4.500 Wh/m<sup>2</sup>

diária, considerada muito boa para aplicações de sistemas fotovoltaicos. Com relação aos dados de produção de energia de todos os sistemas, o pico máximo de produção de energia está registrado em 19,33 kW, no dia 20/03 às 12h30.

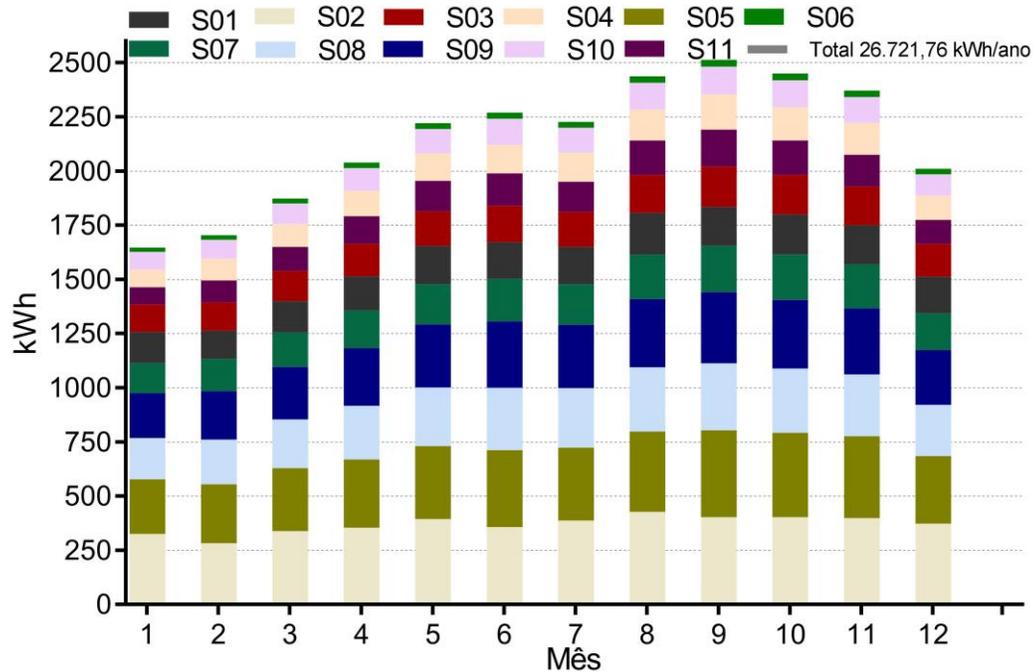


Figura 3.44. Total mensal de geração de energia pelos sistemas instalados.

### 3.3.1 Análise de Energia Térmica

Como pode ser visto na Figura 3.32, o sistema S01 está instalado como beiral fotovoltaico sobre a fachada norte e integrado à edificação (BIPV) e o S02 encontra-se adaptado à cobertura (BAPV) com similar inclinação e ângulo de azimute. Para AGUILAR *et al.* (2018), os módulos fotovoltaicos instalados na cobertura da edificação, além da geração de energia representam outros benefícios desde o ponto de vista térmico, especialmente sobre a parede norte, que é uma das superfícies mais afetadas diretamente pela radiação solar entre os meses de maio a agosto, proporcionando sombreamento a esta superfície e às aberturas nela localizadas. Assim, é avaliado o impacto que esses dois arranjos têm no desempenho térmico das zonas anexas, sua contribuição para diminuição da carga térmica acumulada, as temperaturas internas, e no consumo final.

#### Propriedades termofísicas dos módulos fotovoltaicos

Para realizar uma análise de comportamento das temperaturas de superfícies, cargas térmicas

e temperaturas internas, é necessário conhecer as características termo-físicas dos módulos fotovoltaicos inseridos em condições ambientais padrão.

Para proteção contra agente atmosféricos e umidade, as células fotovoltaicas são encapsuladas em uma película de acetato de vinil-etila (EVA), material não refletor da radiação solar, que assegura o isolamento elétrico entre as células, uma cobertura de Tedlar que isola eletricamente o conjunto de células e com acabamento em moldura de alumínio e placa de vidro. A Tabela 3.21 especifica as espessuras, capacidades térmicas, densidades e condutividades térmicas dos materiais que compõem o módulo fotovoltaico.

Tabela 3.21. Propriedades termo-físicas dos componentes de um módulo fotovoltaico.

<b>Material</b>	<b>mm</b>	<b><math>C_p</math> (J/kg °C)</b>	<b><math>\rho</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b><math>K</math> (W/m °C)</b>
Vidro	4,00	600	2.300	1,13
Silício	0,37	712	2.300	148
EVA	1,00	600	1.800	0,15
Tedlar	0,20	600	2.100	0,24
Alumínio	30,00	903	2.700	237

### **Sistema fotovoltaico como elemento de sombreamento.**

O beiral fotovoltaico atua como elemento de sombreamento sobre a fachada norte, como mostra a Figura 3.45, onde são apresentados dois modelos com a projeção de sombras para o dia 21/06 às 16h00: na parte superior o modelo M\_01 antes da instalação dos módulos fotovoltaicos, e na parte inferior o modelo após a instalação dos módulos solares. Esta fachada é mais atingida pelos raios solares entre os meses de maio e agosto, sendo importante para a diminuição de carga térmica, instalar elementos de sombreamento. A Figura 3.46 mostra as variações de irradiação solar incidente que atinge as superfície da fachada norte, para o mês de junho como o mês em que a declinação solar é maior para o lado norte.

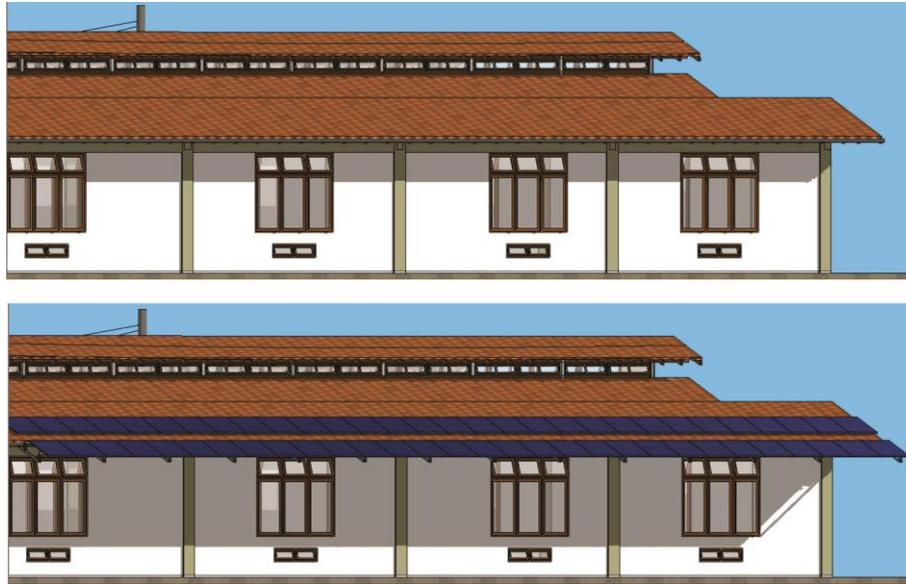


Figura 3.45. Projeção de sombras sobre a parede norte.

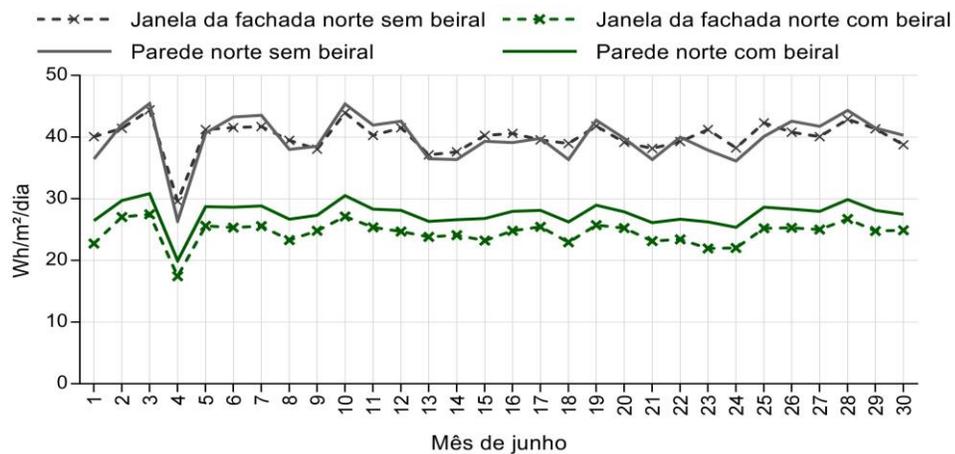


Figura 3.46. Irradiação incidente sobre as superfícies da fachada norte.

### Efeito nas cargas para resfriamento

Para avaliar os benefícios oferecidos pelo S02 instalado sobre a cobertura, é analisada a transferência de calor por fluxo descendente para as zonas anexas. As zonas nas quais a sua cobertura recebe o SFCR, são zonas com sistemas de condicionamento de ar ativo (*Split*). Como primeiro passo é estudado o comportamento da temperatura operativa e das temperaturas da superfície interna da cobertura na Z12, com o sistema de condicionamento de ar desligado e janelas abertas, com a finalidade de evitar a interferência de sistemas mecânicos de ventilação na edificação. Assim, são realizadas as simulações e os resultados das temperaturas operativa e de superfícies são mostrados na Figura 3.47.

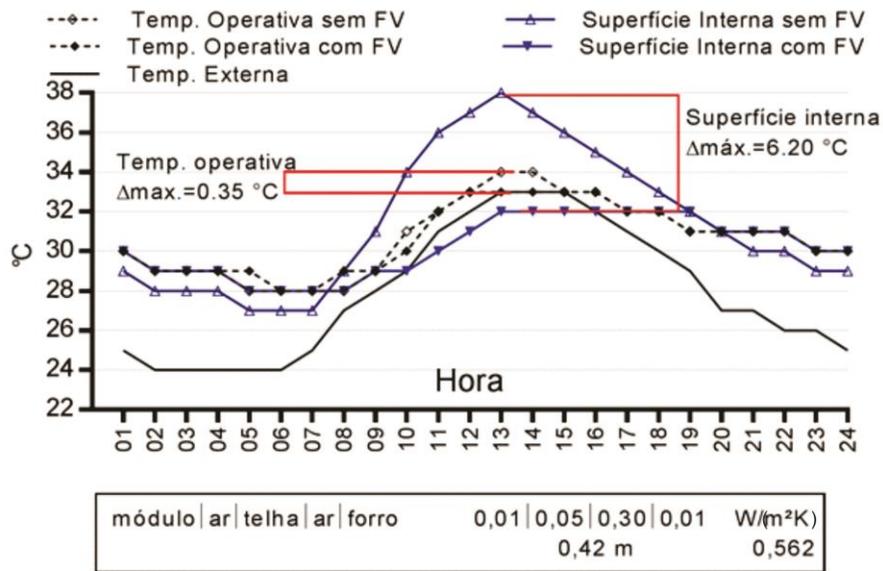


Figura 3.47. Temperaturas operativa e de superfície após instalação do S02 na zona Z12.

Nota-se que a superfície interna da cobertura com sistema fotovoltaico alcança a temperatura máxima às 13h00 e permanece estável no restante do dia. Quando comparado às temperaturas de superfícies com e sem SFCR, percebe-se que a mesma diminui significativamente ( $6,20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) com a instalação do sistema. A temperatura operativa da sala registra uma diminuição pouco significativa, porém destaca-se a estabilidade que a temperatura operativa alcança ao longo das horas da tarde. Com base nestes resultados, percebe-se que há uma clara contribuição na diminuição dos ganhos de calor em contraste com o telhado convencional, pois os módulos fotovoltaicos terminam atuando como isolante térmico. É importante ressaltar que as altas temperaturas internas encontradas correspondem ao clima da região, o que torna evidente a necessidade de condicionamento de ar artificial, destacando-se que os módulos, ao se comportarem como isolante térmico, ajudam a diminuir a necessidade de aparelhos de alta potência.

O comportamento da cobertura fotovoltaica com relação aos valores de carga térmica para resfriamento e ganhos de calor para o interior é comparado com o modelo antes da instalação do sistema. Para conhecer esse comportamento, são avaliadas as zonas térmicas que sofrem influência direta do BAPV/BIPV. As zonas Z11, Z12, Z13 e Z15 são orientadas para o norte, e são avaliadas separadamente para conhecer o impacto direto nos sistemas de condicionamento de ar. A Figura 3.48 mostra a diferença entre as cargas térmicas para refrigeração destas zonas, simuladas para o dia 21/06.

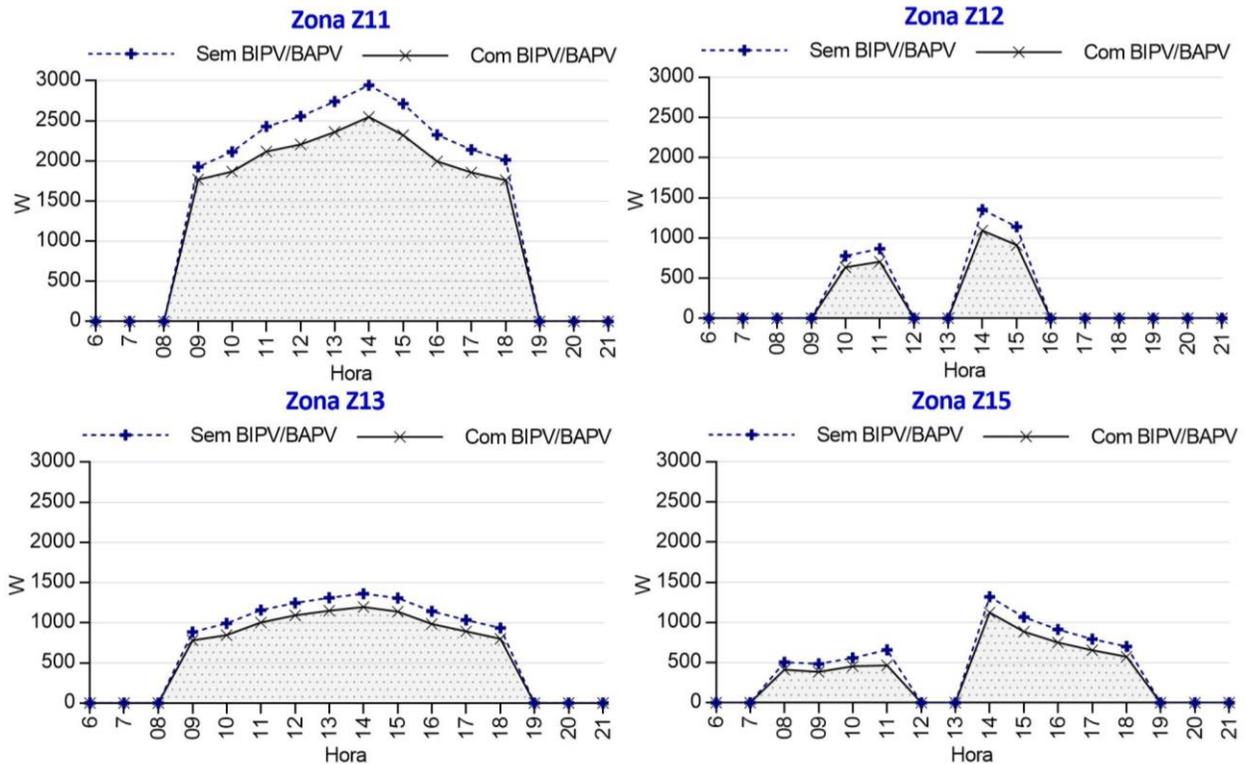


Figura 3.48. Cargas térmicas do dia 21/06 antes e depois do SFCR.

Com a instalação de módulos fotovoltaicos no beiral e sobre a cobertura ocorreu uma diminuição anual média de 12,5 % para as 4 zonas, devido ao aumento da resistência térmica do conjunto, ao sombreamento do beiral e à convecção natural do ar na folga da estrutura. Com a redução da carga térmica para resfriamento, derivada da instalação dos sistemas S01 e S02 na edificação, ocorre uma redução anual de 8,16 % do consumo de energia elétrica em condicionamento de ar, equivalente a 3.710 kWh/ano.

Levando em consideração que o sistema adaptado à parte superior das coberturas ocupa unicamente uma área equivalente a 30 % do total de cobertura de cada zona (Figura 3.32), alcança-se uma redução considerável. Entretanto, esta redução de carga térmica proporcionada pela presença dos módulos fotovoltaicos não foi grande o suficiente para se reduzir a potência nominal dos equipamentos condicionadores de ar existentes, quando comparada com a potência sem a presença dos mesmos, porque não houve uma significativa redução de carga térmica nos horários de pico. Porém, nos meses de maio a julho ocorre uma redução de carga máxima para resfriamento.

### 3.3.2 Impactos das MCE e Economia de Energia Elétrica

O modelo base da edificação em estudo (M\_01) recebe uma série de medidas que influem

diretamente no desempenho térmico e energético. O modelo com as medidas específicas, **MCE-01** (sistemas de iluminação natural), **MCE-02** (isolante térmico e câmara de ar na cobertura e isolante térmico nas paredes leste e oeste), **MCE-03** (MCE-01 e MCE-02 aplicadas em conjunto) e **MCE-04** (MCE-03 em conjunto com SFCR, BIPV E BAPV), denomina-se doravante **M\_02**.

Realizada a análise do impacto causado no comportamento térmico do edifício, e mediante análises comparativas, marcam-se as diferenças entre uma edificação modelada com padrões construtivos e materiais de uso comuns na região e uma edificação com estratégias arquitetônicas destacadas, visando à economia de energia sem sacrificar o conforto. A Tabela 3.22 apresenta um resumo de dados relacionados aos dias de projeto (21/02 e 21/11) em relação à demanda em HVAC, geração e consumo de energia elétrica.

Em edificações de serviços, comerciais e públicas, os sistemas de climatização artificial consomem uma porcentagem importante da energia elétrica necessária para seu funcionamento, principalmente em climas quentes e úmidos, como o da Região Amazônica.

A Figura 3.49, a Figura 3.50 e a Figura 3.51 apresentam dados comparativos entre o modelo base (M\_01) e o modelo da edificação com todas as medidas aplicadas (M\_02). Nelas são apresentadas a demanda elétrica mensal para refrigeração, o consumo mensal de energia por uso final, e o consumo total anual, respectivamente.

Tabela 3.22. Dados gerais para os dias 21/02 e 21/11.

	<b>M_01</b>	<b>M_02</b>
<b>21 de fevereiro</b>		
Temperatura externa máxima (°C)	30,73	30,73
Irradiância máxima global horizontal (W/m <sup>2</sup> )	766,12	766,12
Demanda elétrica máx. em HVAC (kW)	52,78	22,75
Consumo diário de energia elétrica (kWh)	447,61	309,05
Produção diária dos SFCR (kWh)	-	72,96
<b>21 de novembro</b>		
Temperatura externa máxima (°C)	32,75	32,75
Irradiância máxima global horizontal (W/m <sup>2</sup> )	836,5	836,5
Demanda elétrica máx. em HVAC (kW)	53,04	29,68
Consumo diário de energia elétrica (kWh)	447,04	328,08
Produção diária dos SFCR (kWh)	-	75,84

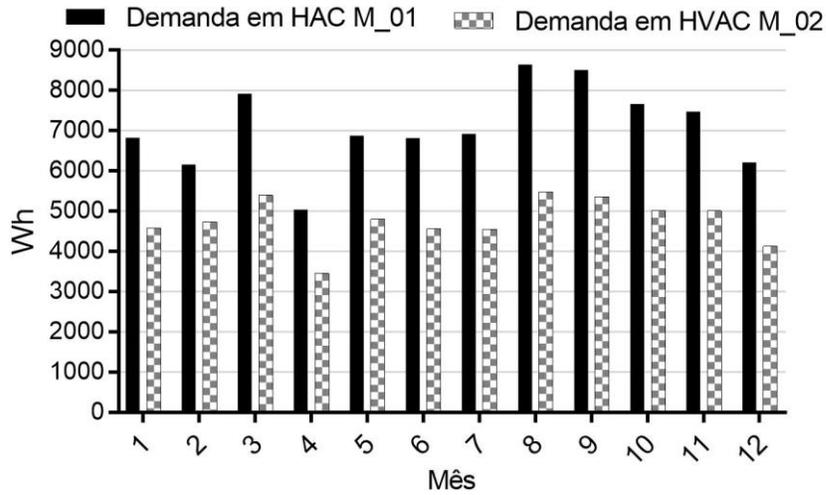


Figura 3.49. Demanda elétrica em HVAC para dos dois casos.

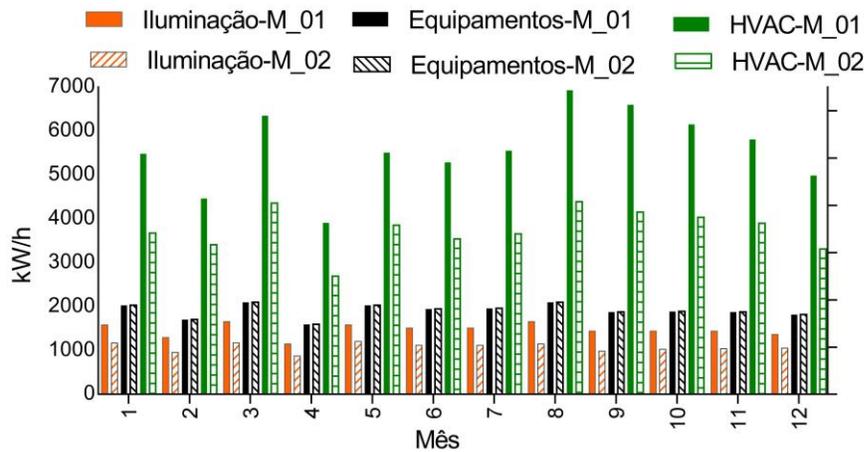


Figura 3.50. Consumo mensal de energia elétrica dos modelos.

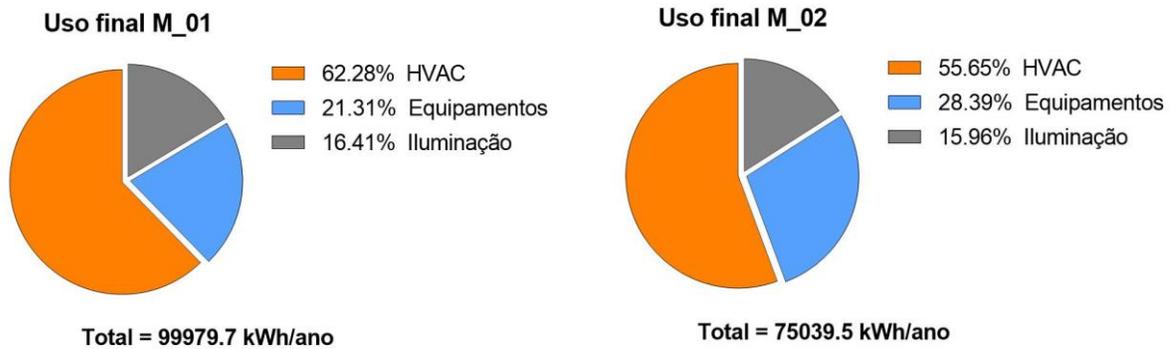


Figura 3.51. Consumo dividido em uso final por modelo.

O modelo M\_02 apresenta o menor consumo de energia elétrica mensal e se apresenta como uma estratégia viável para a economia de energia em edificações, sendo importante para regiões que se caracterizam pelas altas temperaturas, como a Região Amazônica.

### 3.3.3 Energia Produzida e Balanço Geral

Os SFCR da área de testes e os sistemas integrados à edificação possibilitam o aproveitamento de diversas formas. Para estabelecer o nível de penetração de sistemas fotovoltaicos a eletricidade produzida e o consumo de energia é usada a Equação 3.5.

$$C_{pv} = E_{pv}/E_{cons} \times 100 \quad (3.5)$$

onde  $E_{pv}$  é a energia gerada pelo sistema (kWh/ano) e  $E_{cons}$  é a energia elétrica consumida (kWh/ano).

Os onze sistemas fotovoltaicos instalados que contribuem diretamente para atender as cargas da edificação produzem um total anual de 26,72 MWh/ano. A Figura 3.52 mostra a energia consumida para cada uso por mês, resultando no total mensal de energia consumida pelo modelo M\_02 e a energia produzida pelos sistemas. Já na Figura 3.53 mostra-se o consumo líquido da rede da concessionária de distribuição de energia elétrica para os modelos M\_01 e M\_02, e o balanço de energia. Este balanço é obtido pelo consumo da edificação menos a produção dos sistemas fotovoltaicos. A Figura 3.54 mostra as economias resultantes da implantação da MCE, com referência ao M\_01.

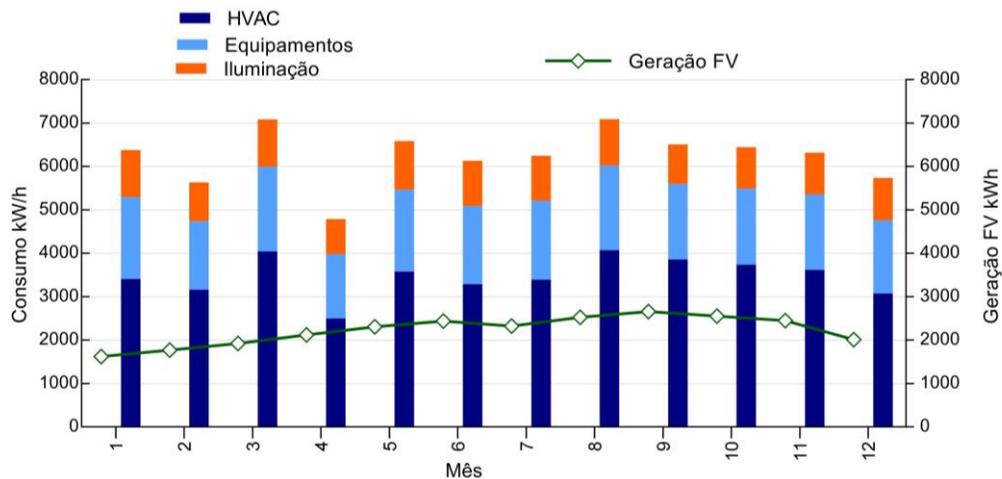


Figura 3.52. Energia consumida por uso final pelo M\_02 e geração dos SFCR.

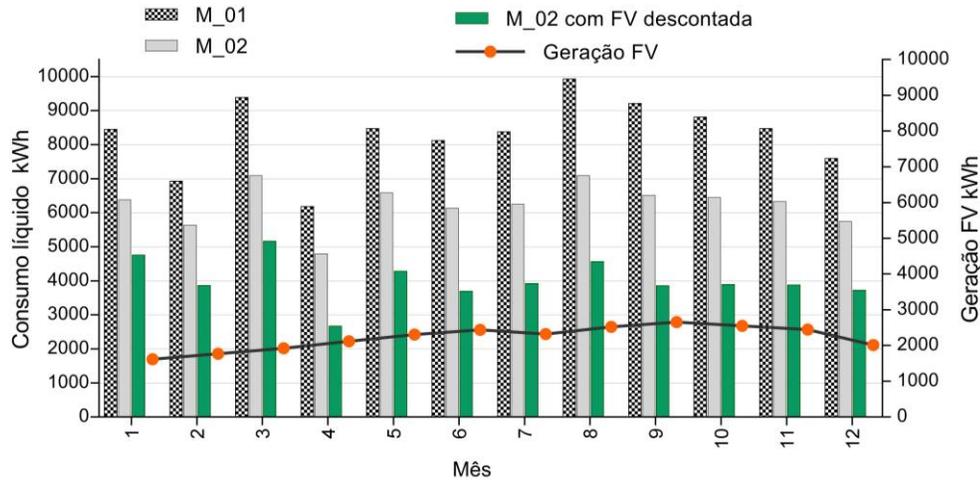


Figura 3.53. Balanço de energia nos modelos M\_01 e M\_02.

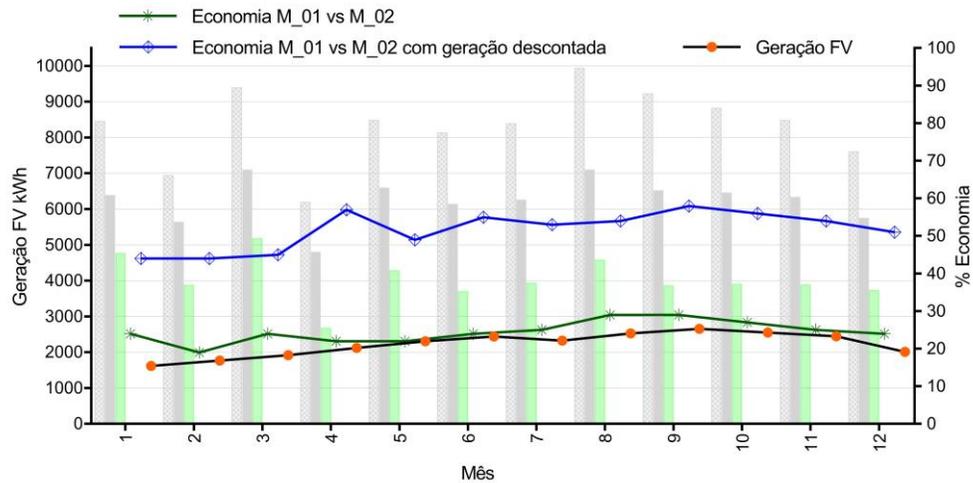


Figura 3.54. Economia de energia nos modelos M\_01 e M\_02.

O consumo anual da edificação, incluindo as medidas já especificadas (M\_02), alcança em torno de 75,04 MWh/ano, onde aproximadamente 56 % deste consumo têm como destino final os sistemas ativos de condicionamento de ar e pouco mais de 44 % estão destinados aos outros usos, como mostra a Figura 3.51. Os SFCR atendem parte do consumo de energia do prédio, equivalente a 35,61 % ao ano, com uma média de 35,83 % mensal. A energia não suprida pelos sistemas fotovoltaicos (64,17 %) é fornecida pela rede da concessionária local, contabilizando 48.317,71 kWh/ano.

Como visto anteriormente, o M\_01 tem um consumo de 99,98 MWh/ano. Após a aplicação das MCE (M\_02) o consumo anual é de 75,03 MWh. Já no M\_02 com desconto da energia gerada pelos sistemas fotovoltaicos, o consumo se reduz a 48,31 MWh/ano. Assim, a economia de energia da edificação, relacionando os modelos M\_01 e M\_02, alcança uma média anual de 24,5 %.

Quando descontada a energia gerada pelos SFCR alcança-se uma economia média anual de 51,64 %.

### 3.3.4 Outros Sistemas

O laboratório conta com outros sistemas de geração de energia a partir de fontes renováveis, instalados na área de testes. Entre esses, destacam-se dois sistemas por servirem diretamente à edificação e atender cargas ou ter funções específicas dentro do sistema elétrico geral. Esses sistemas são: o “Laboratório de Sistemas Híbridos/Minirredes” (BARBOSA et al., 2017), (CORREA et al., 2018), (BARBOSA et al., 2016) e dois “SIGFI” (PONTES, 2014), (LEAL, 2015) e (MAIA, K., 2015).

#### 3.3.4.1 Sistemas Híbridos/Minirredes

O Sistema consiste de um conjunto de equipamentos que compõem um sistema elétrico autossuficiente de fornecimento de energia, com ênfase no recurso renovável. Os componentes do sistema são descritos por CORREA *et al.* (2018) e sintetizados a seguir.

- Sistema de geração - subdividido em 7 geradores fotovoltaicos e 1 grupo gerador diesel (GGD). Os geradores fotovoltaicos reunidos possuem uma capacidade nominal de 13,125 kWp, e o GGD têm capacidade nominal de 12 kVA.

- Sistema de condicionamento de potência - composto por 6 inversores de tensão bidirecionais, de 4,5 kW cada, resultando em uma capacidade total de 27 kW; 3 inversores de tensão conectados à rede, de 700 W cada; 2 inversores de tensão conectados à rede, de 2 kW cada, totalizando 6,1 kW; e 2 controladores de carga conectados respectivamente a dois sistemas fotovoltaicos específicos, somando 6 kW.

- Sistema de armazenamento - composto por 2 bancos de baterias com capacidade de 48 kWh cada.

- Quadros de distribuição e comando (QDC) - destinados à fácil e segura conexão entre os componentes dos sistemas; dentre eles: 1 QDC- Cluster A (ou Multicluster Box), 1 QDC- Cluster B, 2 QDC-FV (Quadro de Distribuição e Comando - Fotovoltaica) e 2 *string boxes*.

O sistema híbrido atende os circuitos de iluminação e tomadas para equipamentos. O sistema possui inversores bidirecionais, que no momento de indisponibilidade da rede da concessionária disponibilizam energia elétrica necessária para atender esses circuitos.

#### 3.3.4.2 Sistemas Individuais de Geração com Fontes Intermitentes (SIGFI)

Em sistemas individuais destacam-se:

- Sistema SIGFI descrito como um Sistema Fotovoltaico Domiciliar (SFD) instalado na área de teste, para fins de acompanhamento e monitoração e posterior análise. O SFD é descrito por MAIA (2015), e está composto por:
  - Sistema de geração de 180 Wp, formado por dois módulos monocristalinos de potência de pico de 90 Wp e eficiência de 16,45 % conectados em paralelo;
  - Sistema de condicionamento de potência constituído por um controlador de carga e um inversor de tensão;
  - Sistema de acumulação composto por 6 baterias estacionárias de 2 V/ 300 Ah cada, conectadas em série, para constituir um banco de 300 Ah de capacidade e 12 V.
- Sistema SGFI descrito como Sistema Fotovoltaico Isolado (SFI), do tipo SIGFI45, também instalado na área de teste (LEAL, 2015), composto por:
  - Seis módulos de 85 Wp, totalizando 510 Wp. O módulo é modelo A-85M, do fabricante Atersa, com potência de pico de 85 Wp, composta por 36 células de silício monocristalino.
  - Um controlador de carga modelo CX40, do fabricante Phocos. O equipamento pode operar com tensões de 12 V ou 24 V, sendo o ajuste feito automaticamente.
  - Um inversor modelo Prosine Sine Wave Inverter 1.000 W, do fabricante XANTREX. Este inversor, de acordo com o manual, possui tensão nominal de entrada de 24 Vc.c., tensão nominal de saída de 120 Vc.a. com frequência de 60 Hz e é do tipo onda senoidal pura. Fornece potência nominal de saída de 1.000 W.
  - Sistema de acumulação de 12 unidades para garantir uma autonomia mínima de 48 horas para suprir o consumo quando a energia entregue pelo painel não for suficiente, com uma autonomia de 48 horas. São baterias modelo 6OPzS-300, do fabricante New Power, com capacidade nominal de 300 Ah, tensão de 2 V, taxa de autodescarga de 5 % por mês, aproximadamente, e pode operar com uma temperatura de no máximo 65 °C.

### 3.4 ANÁLISE ESTÁTICA

Nesta etapa são avaliados os modelos M\_01 e M\_02 levando em consideração a regulamentação nacional, pelo método prescritivo (análise estática), para determinar o nível de eficiência energética de cada modelo.

A análise é baseada no método prescritivo do RTQ-C (MDIC, 2010), que fornece uma classificação de edificações através da determinação da eficiência de três sistemas:

- Envoltória; Iluminação e Condicionamento de ar.

Os três itens, mais bonificações, são reunidos em uma equação geral de classificação do nível

de eficiência da edificação, que é condicionado ao atendimento dos pré-requisitos gerais e específicos.

### 3.4.1 Determinação do Nível de Eficiência Energética

Para a obtenção da classificação geral é utilizada a Equação 3.6, determinada pelo RTQ-C (MDIC, 2010), na qual cada um dos três sistemas individuais recebe um peso. A envoltória corresponde a 30 %, a iluminação a 30 % e o sistema de condicionamento de ar a 40 %.

$$PT = 0,30\left\{\left(EqNumEnv \cdot \frac{AC}{AU}\right) + \left(\frac{APT}{AU} \cdot 5 + \frac{ANC}{AU} \cdot EqNumV\right)\right\} + 0,30(EqNumDPI) + 0,40\left(EqNumCA \cdot \frac{AC}{AU}\right) + \left(\frac{APT}{AU} \cdot 5 + \frac{ANC}{AU} \cdot EqNumV\right) + b \quad (3.6)$$

onde:

*EqNumEnv* - equivalente numérico da envoltória;

*EqNumDPI* - equivalente numérico do sistema de iluminação;

*DPI* - densidade de potência de iluminação;

*EqNumCA* - equivalente numérico do sistema de condicionamento de ar;

*EqNumV* - equivalente numérico de ambientes não condicionados e/ou ventilados naturalmente;

*APT* - área útil dos ambientes de permanência transitória, desde que não condicionados;

*ANC* - área útil dos ambientes não condicionados de permanência prolongada, com comprovação de percentual de horas ocupadas de conforto por ventilação natural (POC) através do método da simulação;

*AC* - área útil dos ambientes condicionados;

*AU* - área útil; e

*b* - pontuação obtida pelas bonificações, que varia de 0 a 1.

Quando cada sistema individual é avaliado, é gerado um equivalente numérico que corresponde à classificação obtida para toda a edificação, e varia entre os valores 5 e 1 (nível A a nível D).

#### 3.4.1.1 Envoltória

A classificação da envoltória faz-se através da determinação de um conjunto de índices referentes às características físicas da edificação. Componentes opacos e dispositivos de iluminação zenital são definidos em pré-requisitos, enquanto as aberturas verticais são avaliadas através de equações (MDIC, 2010). Os métodos para cálculo de transmitância térmica e capacidade térmica dos materiais estão descritos na norma ABNT 15220-2 (ABNT, 2005).

O Laboratório de Energias Renováveis e Eficiência Energética, objeto de estudo, apresenta as características especificadas na Tabela 3.23, que são inseridas na Equação 3.7 para obtenção da eficiência da envoltória, para a zona bioclimática 8 e para edificações com fator de forma mínimo de 0,17.

Tabela 3.23. Características da edificação nos dois modelos.

Largura	m	33,70
Comprimento	m	58,95
Pavimentos		1
Pé direito (médio)	m	3,50
$A_{env}$ - Área da envoltória	$m^2$	2.186,05
$V_{tot}$ - Volume total	$m^3$	4.928,60
$A_{pcob}$ - área de projeção da cobertura	$m^2$	1.408,17
$A_{tot}$ - área total	$m^2$	1.408,17
FA - Fator de altura ( $A_{pcob}/A_{tot}$ )		1
FF - Fator de forma ( $A_{env}/V_{tot}$ )		0,17

$$IC_{env} = -160,36.FA + 1277,29.FF - 19,21.PAF_T + 2,95.FS - 0,36.AVS - 0,16.AHS + 290,25.FF.PAF_T + 0,01PAF_T.AVS - 120,58 \quad (3.7)$$

Posteriormente, são calculados os limites máximos e mínimos do indicador de consumo da volumetria - IC (Índice de Consumo). Para a sua obtenção, os valores inseridos na Equação 3.7 são substituídos pelos valores indicados na Tabela 3.24.

Tabela 3.24. Variáveis para determinar o IC da envoltória do M\_01 e M\_02.

Variável	M_01	M_02	ICmáxD	ICmin
FA	1	1		
FF	0,17	0,17		
PAF <sub>O</sub> - Percentual de abertura na fachada oeste	0,04	0,10 %		
PAF <sub>T</sub> - Percentual de abertura na fachada total	0,08	0,22 %	0,60	0,05
FS - Fator Solar	0,86	0,86	0,61	0,87
AVS - Ângulo vertical de sombreamento total	39°	45°	0	0
AHS - Ângulo horizontal de sombreamento total	4°	5°	0	0
<b>Resultado</b>				
	<b>IC<sub>min</sub></b>	<b>287,41</b>	<b>176,56</b>	
	<b>IC<sub>env</sub></b>	<b>275,73</b>	<b>125,51</b>	
	<b>IC<sub>máx</sub></b>	<b>346,11</b>	<b>385,82</b>	

Assim, a envoltória dos dois modelos se enquadram nos parâmetros técnicos e físicos indicados no RTQ-C para obtenção da ENCE nível A. Porém, é necessário que atendam a todos os

pré-requisitos específicos para manter esta classificação.

### Pré-requisitos Gerais

Os pré-requisitos gerais são necessários para a obtenção da classificação geral do nível de eficiência da edificação. Entre eles é avaliado se a edificação possui circuitos elétricos separados por uso final. O caso em estudo atende este pré-requisito, podendo manter o nível alcançado nos sistemas.

### Pré-requisitos da envoltória

Além dos pré-requisitos gerais, a edificação deve atender pré-requisitos específicos da envoltória. São referentes a:

**Transmitância Térmica.** O cálculo da transmitância térmica é realizado com base nos processos descritos na norma ABNT 15220-2, obtendo-se valores tais como:

- Paredes: para as zonas bioclimáticas 7 e 8 o limite é de 2,5 W/(m<sup>2</sup>K) para paredes com capacidade térmica máxima de 80 kJ/(m<sup>2</sup>K), e 3,7 W/(m<sup>2</sup>K) para paredes com capacidade térmica superior a 80 kJ/(m<sup>2</sup>K) (MDIC, 2010).

- Coberturas: para zonas bioclimáticas 3 a 8: 1,00 W/m<sup>2</sup>K, para ambientes condicionados artificialmente, e 2,00 W/m<sup>2</sup>K, para ambientes não condicionados. Para o M\_01 a cobertura é em telha de barro e forro de PVC; já o M\_02 apresenta cobertura composta de telhas de barro, lâ de vidro, câmara de ar e forro de PVC e cobertura com módulos fotovoltaicos. As transmitâncias encontradas são especificadas na Tabela 3.25.

Tabela 3.25. Transmitância das paredes e coberturas dos modelos.

	M_01	Nível	M_02	Nível
Parede 0,14 m	1,845 W/(m <sup>2</sup> K)	A	1,845 W/(m <sup>2</sup> K)	A
Parede 0,25 m (com isolante térmico)	-		0,30 W/(m <sup>2</sup> K)	
Cobertura	4,55 W/(m <sup>2</sup> K)	E	0,349 W/(m <sup>2</sup> K).	A
Cobertura com FV	-		*	

\* A cobertura com módulos fotovoltaicos não é avaliada segundo o RTQ-C na Nota Técnica N°17/2016. “Os painéis fotovoltaicos com afastamento mínimo de 5 cm entre o painel e a superfície de apoio não devem ser considerados no cálculo de transmitância térmica.”

**Absortância das superfícies.** Segundo o RTQ-C (MDIC, 2010) são obrigatórios na Zona Bioclimática 8: em paredes, a utilização de materiais de revestimento externo com absortância solar baixa (0,50 do espectro solar); e em coberturas, a utilização de cor de absortância solar baixa (0,50

do espectro solar) exceto para telhas cerâmicas não esmaltadas, teto jardim ou reservatórios de água.

As paredes dos dois modelos apresentam absorvância  $\alpha$  de 0,20 e a cobertura formada por telhas de barro não esmaltadas apresenta um bom desempenho devido à porosidade do material.

Assim, com os resultados obtidos ao avaliar o IC e considerando a análise de todos os pré-requisitos, a envoltória do M\_01 terá classificação **E**. Já a envoltória do M\_02 cumpre os pré-requisitos geral e específicos, conclui-se que a classificação para a envoltória deste modelo está no nível **A**.

### 3.4.1.2 Sistema de Iluminação Artificial

A eficiência energética do sistema de iluminação da edificação pode ser avaliada por dois métodos prescritivos do RTQ-C, o “Método da Área da Edificação” e o “Método das Atividades da Edificação”, para os quais os resultados da avaliação do sistema são apresentados a seguir. Após realizada a avaliação, é indicada a utilização do “Método da Área da Edificação”, por apresentar várias vantagens, tais como:

- Avaliação mais simples quando comparada ao método das atividades (resultando, geralmente, em redução do custo da proposta de etiquetagem do projeto pelo INMETRO);
- Caracterização da edificação como somente uma atividade principal;
- Obtenção de maior Equivalente numérico de Iluminação da edificação (EqNumDPI), em particular utilizando o referido método.

A seguir são especificadas as características dos dois modelos, onde são identificadas as três principais funções que são realizadas no prédio, conforme a Tabela 3.26:

Método utilizado - Método das áreas;

Área útil iluminada - 1.408,17 m<sup>2</sup>;

Função/principal uso - Escola/Universidade, ocupando mais de 30 % da área do edifício;

Potência instalada - 8.998,20 W;

DPI - 6,39 W/m<sup>2</sup>.

Tabela 3.26. Potência instalada e potência limite de cada atividade.

<b>Função</b>	<b>Área m<sup>2</sup></b>	<b>DPIL nível A W/m<sup>2</sup></b>	<b>Potência limite W</b>	<b>Potência instalada W</b>
Escola/Universidade	1.016,27	10,7	10.874,08	6.493,96
Escritório	196,90	9,7	1.909,93	1.258,19
Oficina	195,00	12,9	2.515,50	1.246,05
Total			15.299,51	8.998,20

### Pré-requisitos de iluminação

Para atender o nível A, são necessários os seguintes pré-requisitos:

- Todos os ambientes possuem dispositivos de controle manual e facilmente acessíveis para o acionamento das luminárias.
- Luz Natural. Todos os ambientes atendem, uma vez que possuem acionamento diferenciado para a fileira de luminárias próximas às janelas;
- Desligamento Automático. Nenhum ambiente possui área superior a 250 m<sup>2</sup>, não havendo, portanto, a necessidade de atender este pré-requisito.

Os modelos atendem também o pré-requisito geral de divisão de circuitos. A iluminação artificial possui um circuito independente;

Com os resultados obtidos e o atendimento dos pré-requisitos, conclui-se que a classificação para o sistema de iluminação artificial dos M\_01 e M\_02 está no nível A.

#### 3.4.1.3 Sistema de condicionamento de ar

Para a classificação dos sistemas de condicionamento de ar do edifício é considerada a mesma classificação dos aparelhos utilizados nas simulações, tanto instalados quanto em projeto. Os equivalentes numéricos (EqNum) de cada ambiente estão especificados na Tabela 3.27.

Tabela 3.27. Classificação dos equipamentos de condicionamento de ar.

Zona	Nível	EqNum	Zona	Nível	EqNum
02	B	4	17	A	5
03	A	5	18	A	5
05	B	4	19	A	5
06	B*	4	20	A	5
07	B	4	21	A	5
09	A	5	22	A	5
10	B	4	23	A	5
11	A	5	24	A	5
12	B	4	25	A	5
13	B	4	26	A	5
14	B	4	27	A	5
15	A	5	28	A	5
16	B	4	29	A	5
			30	A	5

\*Instalado nível A após a avaliação

Os aparelhos classificados com nível B, que se encontram instalados, foram adquiridos pela IES antes da avaliação da edificação. Nas zonas Z17 a Z30 serão instalados aparelhos de nível A.A

média aritmética dos equivalentes numéricos resulta em um EqNum de 4,66 para o sistema de condicionamento de ar, obtendo então etiqueta **A** para os dois modelos.

O sistema de condicionamento de ar atende o pré-requisito específico para nível A, sobre isolamento térmico de tubulações para sistemas de refrigeração, com condutividade térmica e espessura mínima dentro das faixas estipuladas.

#### **3.4.1.4 Bonificações**

O modelo M\_01 não apresenta bonificações, pois foi concebido sem sistemas adicionais de economia energética ou de aparelhos economizadores de água.

As bonificações avaliadas para o modelo M\_02 estão resumidas em dois itens: geração de parte da energia consumida pelo edifício por meio de painéis fotovoltaicos e aproveitamento de água da chuva e equipamentos racionalizadores de água.

##### **• Geração Fotovoltaica**

O consumo energético anual do prédio é de 75,03 MWh, apresentando mensalmente uma média de 6,25 MWh. A edificação conta com onze sistemas fotovoltaicos que produzem anualmente 26,7 MWh.

A produção energética a partir dos sistemas fotovoltaicos corresponde a um valor aproximado de 35,6 % do consumo anual da edificação. Para obter 1 ponto nas bonificações o RTQ-C recomenda no mínimo 10 % do consumo anual de energia gerada a partir de fontes renováveis. Com esses sistemas esta bonificação favorece a edificação em 1 ponto na equação geral.

##### **• Aproveitamento de água da chuva e equipamentos racionalizadores de água**

O sistema de aproveitamento de água da chuva consiste de um reservatório elevado de 5.000 litros, que recebe água exclusiva da concessionária, e um de 3.000 litros para água da chuva.

Para o cálculo do consumo de água previsto para a edificação é usado o valor de 50 litros per capita para edificações públicas ou comerciais, com uma ocupação diária de 60 pessoas e com uma jornada de ocupação de 5 dias por semana (CREDER, 2006). Segundo a vazão permitida (L/s) para consumo de água em função do tipo de dispositivo utilizado pelo RTQ-C e no consumo per capita, é encontrado um valor de 13.000 L/hab/ano.

São adicionadas informações sobre o abastecimento de cada aparelho conforme o projeto hidráulico, indicando quais aparelhos são providos por água da concessionária e quais abastecidos pelo aproveitamento e filtragem da água da chuva. Assim, encontrou-se um valor percentual representativo de 10.274,94 L/hab/ano de aproximadamente 53,97 % para consumo de água da concessionária, e 46,03 % para água da chuva, considerando a caixa de água sempre com vazão disponível. Para obter 1 ponto nas bonificações é necessário que no mínimo 40 % do consumo

anual de água seja obtido por meio de aproveitamento de água de chuva. Como 46,03 % da água consumida provém desta fonte, esse total corresponde a 1 ponto na equação geral.

A pontuação obtida em bonificação pela edificação foi de um ponto para cada bonificação incluída; entretanto, a pontuação máxima que pode ser alcançada por meio das bonificações é de **um (1) ponto**.

### 3.4.2 Classificação Geral

Após a análise dos três sistemas individuais e das bonificações, aplicaram-se os valores obtidos na fórmula de rendimento geral (Equação 3.6).

O M\_01 obteve o equivalente numérico de 2,15, alcançando o nível **D** e o M\_02 obteve o equivalente numérico de 5, alcançando o nível **A**. Esta classificação é confirmada caso sejam atendidos os pré-requisitos para a classificação geral, apresentados a seguir.

#### 3.4.2.1 Pré-requisitos para o nível A

- **Circuitos Elétricos.** A edificação apresenta circuitos elétricos com possibilidade de medição centralizada por uso final: iluminação, sistema de condicionamento de ar, e tomadas/equipamentos.
- **Aquecimento de água.** A edificação não apresenta sistema de aquecimento de água.

A edificação representada no M\_01 recebe uma **ENCE D**, considerada não eficiente. Já o modelo M\_02, que atende os pré-requisitos gerais para o nível A, está apta para receber a **ENCE A** e o selo PROCEL EDIFICA.

## 3.5 PROPOSTA PARA MELHORAR O DESEMPENHO

### 3.5.1 Instalação dos sistemas fotovoltaicos na cobertura da edificação

Os módulos fotovoltaicos apresentam comprovados benefícios no desempenho térmico da cobertura e como elemento de sombreamento em edificações da Região Amazônica (AGUILAR et al., 2018). Como mostra a Figura 3.32, os sistemas S03 a S11 estão instalados em áreas externas à edificação. Propõe-se a instalação desses sistemas integrados à totalidade do beiral das fachadas

norte e sul, e adaptação nas coberturas que não apresentem sombreamento pelos próprios elementos da edificação. Em função da área de módulos de cada sistema e das áreas das coberturas, são modeladas as áreas instaladas no beiral e sobre algumas áreas da cobertura, como mostra a Figura 3.55. A análise realizada refere-se unicamente ao impacto dos SFCR sobre a diminuição da carga térmica da edificação. A Figura 3.56 mostra o consumo de energia elétrica em sistemas de condicionamento de ar, comparado com o M\_02, após a instalação dos sistemas fotovoltaicos na cobertura.

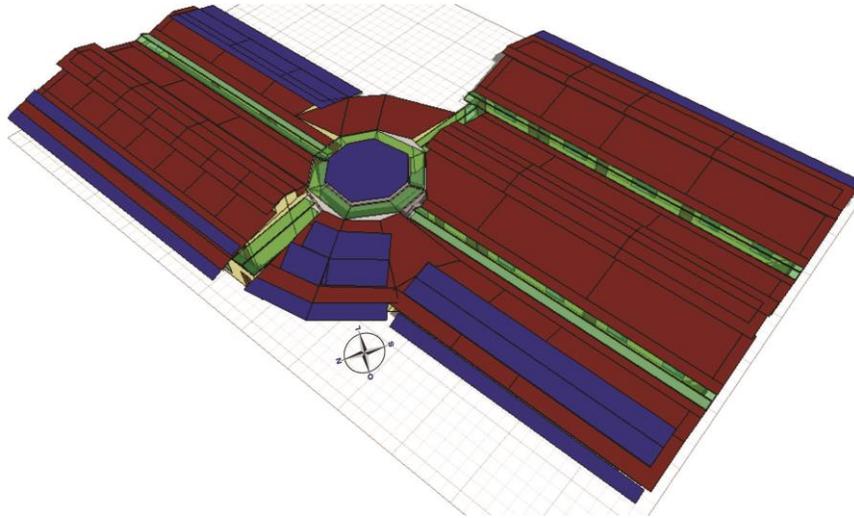


Figura 3.55. Proposta de instalação dos módulos fotovoltaicos nas coberturas.

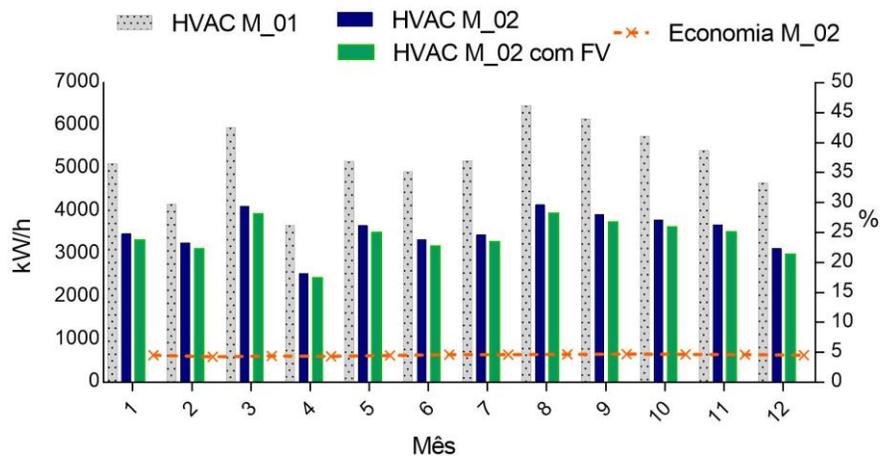


Figura 3.56. Consumo de energia em HVAC dos modelos com SFCR na cobertura.

Com a distribuição dos módulos fotovoltaicos na cobertura da edificação e a contribuição para redução da carga térmica nos espaços internos, percebe-se uma redução de até 4,73 % no consumo mensal de energia elétrica para condicionamento de ar, o que contribuí para a diminuição

de custos em função do alto consumo em HVAC registrado.

### 3.6 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Na avaliação da edificação nos diferentes modelos, mostra-se viável a aplicação de uma série de MCE para alcançar um balanço energético favorável e melhoria da eficiência da edificação como um todo. Com estas estratégias a edificação passa a aproveitar a iluminação natural em alta porcentagem das horas do dia, reduz ganhos de calor transmitidos para o interior ao modificar o desempenho térmico da envoltória, e recorre à produção de energia elétrica para atendimento parcial da demanda da edificação.

Em economia alcançada quando os espaços são atendidos com iluminação natural suficiente para as atividades neles realizadas, obtém-se, em intervalos horários, uma economia anual da ordem de 4.429,24 kWh, equivalente a 27 % da energia elétrica ativa usada unicamente em iluminação artificial, e 4,43 % do total de energia elétrica consumida. No entanto, ao fazer a simulação da MCE-03 os resultados mostram que há um aumento na carga térmica, prejudicando o desempenho da edificação.

A instalação de isolantes térmicos e de câmara de ar mostra-se ainda mais favorável para a economia de energia em edificações. Os SFCR existentes no laboratório, depois de validados os dados obtidos nas medições e nas simulações, são incluídos na edificação para atender parte da demanda. O impacto destes sistemas é registrado tanto para as cargas térmicas da edificação quanto em termos de redução de consumo de energia elétrica proveniente da concessionária.

## 4 ANÁLISE ECONÔMICA

Neste capítulo é realizada uma análise de desempenho econômico da edificação com as medidas implementadas. Para determinar o custo de energia conservada, faz-se uso das tarifas aplicadas pela concessionária local, de indicadores econômicos e, posteriormente, cada MCE é avaliada em termos de economia monetária. Finalmente é estudada a viabilidade econômica do M\_02 com a geração fotovoltaica em cada capital dos estados que formam a Amazônia Legal Brasileira.

### 4.1 VARIÁVEIS ECONÔMICAS

#### 4.1.1 Cálculo Tarifário

A estrutura tarifária, que é o conjunto de tarifas aplicadas de acordo com a modalidade de fornecimento, é dividida em:

- Convencional – Nesta modalidade, um valor de demanda pretendida pelo consumidor é definido independentemente do horário do dia (ponta ou fora de ponta) ou período do ano (seco e úmido). Além disso, apenas uma tarifa é aplicada sobre o consumo;
- Horo-sazonal verde – Nesta estrutura, o contrato entre concessionária e consumidor estabelece uma demanda independentemente do horário do dia, e são aplicadas tarifas diferentes de consumo no horário de ponta e fora de ponta;
- Tarifa Horo-sazonal azul – Os consumidores dos subgrupos A1, A2 e A3 são obrigatoriamente enquadrados nesta estrutura, e para os subgrupos A3a, A4 e AS é opcional a adoção. Nesta modalidade, o contrato estabelece valores diferentes de demanda no horário de ponta e fora de ponta. Além disso, também são aplicadas tarifas diferentes de acordo com a hora do dia.

##### 4.1.1.1 Tarifa Horossazonal Verde

Essa modalidade tarifária exige um contrato específico com a concessionária, no qual se pactua a demanda pretendida pelo consumidor (Demanda Contratada) independentemente da hora do dia (ponta ou fora de ponta). Embora não seja explícito, é permitido que sejam contratados dois valores diferentes de demanda, um para o período seco e outro para o período úmido. Vale destacar que no período seco (maio a novembro) as tarifas são mais caras que no período úmido. A fatura de energia elétrica desses consumidores é composta pela soma de parcelas referentes ao consumo (na ponta e fora dela), demanda e ultrapassagem.

A Universidade Federal do Pará (UFPA), onde está inserida a edificação, está incluída dentro do Grupo Tarifário A, subgrupo A4, que faz parte de uma UC principal de energia elétrica da Universidade: UC-19. Essa UC engloba 84 (oitenta e quatro) unidades acadêmicas e/ou administrativas dentro do Campus Universitário do Guamá e tem o seu fornecimento de energia elétrica em 13,8 kV. Atualmente a UC-19 é atendida pela concessionária local na tarifa horossazonal verde, com demanda contratada de 5.900 kW (MATOS, 2016). Os valores praticados pela concessionária local para a UC-19, atendimento de 2,3 kV a 25 kV, disponibilizados pelo Departamento de Infraestrutura da UFPA (DINFRA), estão especificados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Tarifas praticadas para UC-19 (06/2018). Fonte: DINFRA – Infraestrutura – UFPA

<b>Posto tarifário</b>	<b>Valor (R\$/kWh)</b>
Ponta (18h30 - 21h29)	3,582224
Fora de Ponta (demais horários)	0,459148

Estes valores incluem os tributos correspondentes a ICMS (25 %), COFINS (6,8788 %) e PIS (1,574 %). Não é considerada na presente análise a cobrança do valor de demanda, pois a demanda da edificação dentro do contexto geral, inserida no campus da universidade, não é significativa em relação à demanda contratada pela instituição.

#### **4.1.1.2 Tarifa Grupo B3**

O Grupo B é composto de unidades consumidoras com fornecimento em tensão inferior a 2,3 kV, caracterizado pela tarifa monômnia. Entende-se por tarifa monômnia aquela que é constituída por valor monetário aplicável unicamente ao consumo de energia elétrica ativa, obtida pela conjunção da componente de demanda de potência e de consumo de energia elétrica que compõe a tarifa binômnia. E entende-se por tarifa binômnia aquela que é constituída por valores monetários aplicáveis ao consumo de energia elétrica e à demanda faturável.

Segundo o Art. 100 da Resolução Normativa 414 da ANEEL (ANEEL, 2010), em Unidade Consumidora (UC) ligada em tensão primária, o consumidor pode optar por faturamento com aplicação da tarifa do grupo B, correspondente à respectiva classe, se a soma das potências nominais dos transformadores for igual ou inferior a 112,5 kVA. A edificação possui um transformador com capacidade de 112,5 kVA, podendo-se contextualizar no grupo B3.

Assim, este estudo avalia a mesma edificação independentemente da UC-19, onde a edificação se torna uma UC independente, que passa a ser atendida pela modalidade tarifária do grupo B, subgrupo B3 (“Demais Classes”). Entende-se também que, em termos gerais, edificações caracterizadas de forma similar à tratada no presente estudo de caso, devido ao porte e demanda, têm conexão à rede elétrica em baixa tensão e são enquadradas no grupo tarifário B. Como

exemplo, estão neste grupo edificações residenciais, agências bancárias e uma parcela importante de edifícios comerciais.

Por isso, é simulado um cenário como uma unidade consumidora do grupo tarifário B (atendida em baixa tensão), e com tarifa monômnia. Para edificações comerciais, de serviços e públicas atendidas em baixa tensão, a concessionária local de energia elétrica classifica-as como do tipo B3, com valor da energia vigente cobrado pela concessionária local de R\$ 0,59902/kWh, sem tributos (CELPA, 2018). Os tributos incluídos no cálculo com tarifa do grupo B3, correspondem a ICMS (25 %), PIS (1,26 %) e COFINS (6,1282 %).

#### **4.1.2 Indicadores de Desempenho Econômico**

*Análise de investimento* - Os resultados do investimento são expressos por meio de indicadores tais como: Valor presente líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR), e *Payback* Descontado (PBD).

Para isso, o valor do dinheiro no tempo é corrigido considerando os seguintes parâmetros:

*Taxa de juros (i)* - Como critério na definição das taxas de desconto considerou-se o valor da taxa SELIC (6,9 %) descontada a inflação efetiva, valores estabelecidos pelo Banco Central do Brasil para o período de 2017 (BACEN, 2018).

*Inflação* - A inflação oficial no Brasil para o ano de 2017, foi registrada em 2,95 % (BACEN, 2018). Este valor é usado para efeitos de cálculo da viabilidade econômica.

## **4.2 CUSTO DE OBRA CIVIL**

Os cálculos de custos de obra civil são baseados nas tabelas publicadas pelo Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI) e publicados na página WEB da Caixa Econômica Federal (SINAPI, 2018). Para o ano de 2017, o custo da construção do Laboratório de Energias Renováveis e Eficiência Energética estima-se em um valor aproximado de R\$ 3.265.733,30, valor no qual estão incluídos os custos de materiais e insumos referentes às Medidas de Conservação de Energia especificadas. A Tabela 4.2 apresenta o resumo de custos de obra civil.

Tabela 4.2. Resumo dos custos de obra da área construída e área projetada para o ano 2017.

Projeto: <b>Laboratório de Energias Renováveis e Eficiência Energética</b>			
Modalidade: <b>Público (ensino)</b>			
Localização: <b>Universidade Federal do Pará-Campus Belém</b>			
Área total: <b>1.408 m<sup>2</sup></b>			
	<b>Item</b>	<b>Valor</b>	<b>%</b>
1	Serviços preliminares	R\$ 57.307	1,75
2	Serviços de terra	R\$ 20.056	0,61
3	Fundações	R\$ 608.331	18,63
4	Estrutura	R\$ 369.305	11,31
5	Alvenaria	R\$ 102.842	3,15
6	Cobertura em telha de barro	R\$ 171.132	5,24
7	Cobertura em policarbonato	R\$ 19.304	0,59
8	Isolamento térmico	R\$ 42.131	1,29
9	Esquadrias de madeira	R\$ 180.330	5,52
10	Revestimento de paredes	R\$ 30.568	0,94
11	Rodapés e soleiras	R\$ 10.721	0,33
12	Pisos internos	R\$ 93.447	2,86
13	Revestimentos de forros	R\$ 78.079	2,39
14	Pintura	R\$ 129.288	3,96
15	Instalações eletromecânicas	R\$ 370.334	11,34
16	Serviços complementares/BDI	R\$ 982.560	30,09
		<b>R\$ 3.265.733,30</b>	

#### 4.2.1 Análise de Custos das MCE

Os valores estabelecidos para cada MCE são referentes a materiais e custos de insumos, segundo a tabela SINAPI ou pesquisas realizadas em casos como o policarbonato, por exemplo. A seguir, cada medida é analisada com base nos valores especificados e os valores derivados da inclusão, por mudanças, de outros elementos.

Para efeitos de cálculo de custos e benefícios de implementação das MCE, o modelo base (M\_01) é projetado com características arquitetônicas consideradas comuns na região, principalmente quando se trata de pouco aproveitamento de iluminação natural, pouco uso de isolantes térmicos em superfícies e geração de energia elétrica na própria edificação.

##### 4.2.1.1 MCE-01-Aproveitamento de iluminação natural

Os custos de obra física do M\_01 (sem as MCE) é calculado com os materiais e estratégias consideradas pouco eficientes, e a diferença de preços entre este e o modelo com os materiais e

elementos arquitetônicos aplicados, é considerada como o custo da MCE.

A seguir são expostas as alterações na obra física para implementação da MCE-01 (Figura 3.13).

- *Janelas*. As janelas do modelo base, para efeitos de simulação, são com caixilho em alumínio com dimensões de 1,20 m x 1,00 m (LxA) e 2,00 m x 1,00 m (LxA). Estas janelas são substituídas por janelas com caixilhos em madeira da região, com dimensões de 1,80 m x 1,25 m e janelas de 2,50 m x 1,25 m respectivamente;

- *Balancins*. No M\_01 não são incluídos balancins. A MCE-01 prevê então, a inclusão de balancins na parte superior de todas as janelas e portas de acesso, de igual largura e 0,50 m de altura; na parte inferior das janelas externas, de 1,00 m de largura por 0,30 m de altura; e na parte superior da parede sul e nos banheiros e copa;

- *Lanternins*. À geometria do M\_01 são incluídos lanternins na parte superior dos blocos centrais, onde os espaços internos não dispõem de acesso direto ao exterior. Consiste em uma estrutura de madeira de lei, de 0,50 m na altura mais baixa, com balancins de 0,25 m e cobertura em telha de barro;

- *Iluminação zenital*. A cobertura em telha de barro nas circulações internas do M\_01 é substituída por cobertura semitransparente em policarbonato alveolar refletivo de 6 mm de espessura, apoiado em estrutura metálica tubular.

Os custos com obra civil calculados para implantar estas estratégias para aproveitamento da iluminação natural no projeto, têm um valor aproximado de R\$ 198.630,00, equivalente a 6,08 % do valor total da obra.

#### 4.2.1.2 MCE-02 - Sistemas de isolamento térmico e câmara de ar

Os cálculos de economia monetária com a aplicação de isolamento térmico e a instalação de câmara de ar estão associados unicamente aos custos iniciais de compra e instalação do material e economia com o consumo de energia elétrica. Portanto, os efeitos da utilização adequada de isolamento térmico de superfícies externas da edificação resultam em poupanças derivadas da diminuição do consumo de energia necessária para resfriamento. Os valores são analisados em comparação com o consumo de energia do edifício base, com posterior aplicação de isolante térmico em paredes e cobertura. O custo econômico de isolamento térmico está relacionado com o custo da compra de material e o custo de sua instalação (DYLEWSKI; ADAMCZYK, 2011), e é calculado na Equação 4.1.

$$C_{isol} = (C_m + C_w)p \quad (4.1)$$

onde,  $C_{isol}$  é o custo final do isolamento térmico,  $C_m$  o custo por  $m^2$  do isolante térmico,  $C_w$  o custo de instalação por  $m^2$  de área, e  $p$  a área aplicada.

Na edificação são utilizados isolantes térmicos nas paredes e cobertura, com as seguintes áreas:

- Manta isolante térmica dupla face: 1.115,52 m<sup>2</sup> instalados na cobertura;
- Pannel semirrígido instalado entre parede dupla de tijolo na parede leste: 78,05 m<sup>2</sup>;
- Pannel semirrígido instalado entre parede dupla na parede oeste: 81,02 m<sup>2</sup>.

No total são utilizados 1.115,52 m<sup>2</sup> de manta isolante na cobertura e 159,07 m<sup>2</sup> de pannel semirrígido nas paredes leste e oeste. Para construção da parede dupla nas paredes leste e oeste faz-se necessário o levantamento da parede lateral em tijolo.

Este material foi avaliado em um total de R\$ 3.723,17 o pannel semirrígido de lã de vidro, e R\$ 38.407,35 a manta isolante dupla face, totalizando R\$ 42.130,52 para isolamento térmico e R\$ 9.918,70 para alvenaria em tijolo furado de 0,09 m. O total aproximado da medida é de R\$ 52.049,00.

A câmara de ar não foi orçada com custo adicional, pois consiste na instalação do forro especificado, a uma distância de 0,40 m. do madeiramento sob a manta isolante térmica. Esta câmara de ar funciona como amortecedor dos fluxos de calor e ventilação da cobertura.

#### 4.2.1.3 MCE-03 - Sistemas fotovoltaicos

Em um sistema fotovoltaico os custos de investimento são conhecidos por serem mais elevados. Os custos do investimento inicial de sistemas fotovoltaicos conectados à rede podem ser expressos pela Equação 4.2 (MANGAN; KOÇLAR, 2016).

$$C_{Inv} = C_{sist} + C_{ins} \quad (4.2)$$

onde,  $C_{inv}$  é o custo de investimento inicial do sistema,  $C_{sist}$  é o custo total dos equipamentos (incluindo módulos, inversores, acessórios e cabeamento),  $C_{ins}$  é o custo de instalação (incluindo projeto).

A determinação do VPL através do fluxo de caixa descontado (FCD) surge como uma opção válida para avaliação de custos, mostrando-se adequado para os vários eventos de fluxo de caixa de um sistema solar fotovoltaico e suas operações. O custo da energia (com tarifa reajustada anualmente), a produção anual de energia, a degradação anual do gerador fotovoltaico, o custo de substituição do inversor, despesas de manutenção, e outras influências podem ser controlados individualmente. Para avaliar o grau de conveniência econômica do investimento com base no ciclo de vida, o VPL e o PBD são métodos utilizados para resumir bem os fluxos de caixa no sistema e a vida útil (MANGAN; KOÇLAR, 2016) (FINLAY, 2013). Assim, esta análise leva em consideração o valor do dinheiro ao longo do tempo como um indicador econômico, a fim de considerar o período de retorno, como expresso na Equação 4.3.

$$VPL = \sum_{t=1}^N \frac{Q_t}{(1+i)^t} - C_{inv} \quad (4.3)$$

onde  $Q_t$  é a remuneração líquida no ano  $t$  (deduzidos os custos com operação, manutenção e de reposição de equipamentos/acessórios no período  $t$ ), conforme a Equação 4.4,  $i$  é a taxa de desconto,  $N$  é o tempo de vida do sistema (anos), e  $C_{inv}$  é o investimento inicial do sistema.

$$Q_t = p_{pv,t} x E_{pv,t} - C_{O\&M,E,t} \quad (4.4)$$

onde  $p_{pv}$  é a tarifa para o sistema fotovoltaico (\$/kWh) no ano  $t$ , considerando o reajuste tarifário no ano  $t$ ;  $E_{pv}$  é a quantidade de energia elétrica gerada no ano  $t$  (kWh/ano), considerando a depreciação anual da energia produzida,  $C_{O\&M,E,t}$  é o custo anual com operação e manutenção, adicionando também o custo de reposição (se houver) de equipamentos/acessórios no ano  $t$ ; considera-se este valor corrigido com a inflação ao longo do tempo.

Os SFCR levados em consideração para esta análise estão instalados na área externa à edificação, com exceção dos sistemas S01 e S02, que são integrados e adaptados à sua estrutura. Para estes sistemas os custos de instalação estão incluídos no projeto, sendo adicionais à obra, isto é, não participando diretamente dos custos de obra civil utilizados.

### 4.3 ECONOMIA MONETÁRIA

Para avaliação da viabilidade econômica de cada uma das medidas especificadas, e todas em conjunto, são realizadas duas avaliações: com a tarifa Horossazonal Verde vigente, por ser a tarifa registrada para a UC-19, e com a tarifa vigente para o grupo B3, com a finalidade de avaliar a viabilidade dentro deste grupo tarifário, como UC independente. O período de análise considerado em todas as avaliações é de 25 anos, por ser o período considerado como vida útil dos sistemas fotovoltaicos. Para conservar o mesmo padrão de análise, este período é usado também para as MCE referentes à obra civil.

Um projeto de investimento mostra-se rentável quando o VPL é maior que zero para o período considerado, tendo portanto, a taxa interna de retorno (TIR) maior que a taxa de desconto ou de atratividade ( $i$ ).

#### 4.3.1 Economia com Iluminação Natural

As diferenças em consumo de energia com a MCE-01, entre o modelo sem aplicação da medida (M\_01) e o modelo com as adaptações propostas, são calculadas unicamente para consumo de energia ativa para iluminação artificial. Como visto anteriormente, é registrada uma economia

em energia equivalente a 4.429,24 kWh/ano, sendo 453,16 kWh em consumo na ponta e 3.976,08 kWh em consumo fora da ponta.

Aplicando a tarifa HSV vigente, alcança-se uma economia de R\$ 3.062,66 no primeiro ano, representando uma redução de 34 % do total que seria pago pelo M\_01 em energia elétrica para iluminação. Do mesmo modo, quando calculado com a tarifa do grupo B3, apresenta uma economia no primeiro ano de R\$ 3.512,54, não apresentando rentabilidade econômica para a UC. O valor evitado no primeiro ano corresponde a uma economia de 27 % do valor total pago em energia elétrica para iluminação.

Esta economia monetária reduzida, relacionada ao investimento da MCE analisado a 25 anos, apresenta-se como de baixo atrativo, dada a inexistente rentabilidade econômica e sem possibilidades de recuperação do investimento, no ciclo analisado. Entretanto, um fator importante a ser levado em consideração, é a economia obtida com o aumento da vida útil das lâmpadas, ao diminuir as horas de uso, após a implantação da medida.

### 4.3.2 Economia com Isolante Térmico

A MCE-02, analisada em relação a custos de energia poupada, fornece uma economia no primeiro ano de R\$ 8.695,68, calculada com a tarifa horossazonal verde vigente para a UC. Esta economia equivale a 17,39 % do valor total anual gasto em energia elétrica.

Analisada com a tarifa para o grupo B3, obtém-se uma economia bastante representativa, da ordem de R\$ 17.541,23 no primeiro ano, equivalente a 22,12 % do custo total anual da edificação.

A Tabela 4.3 apresenta os resultados obtidos com o cálculo de indicadores econômicos (VPL, PBD e TIR) durante um período de 25 anos, e a economia monetária alcançada no primeiro ano com a aplicação do isolante térmico.

Tabela 4.3. Economia com isolante térmico.

<b>Tarifa</b>	<b>Economia %</b>	<b>VPL R\$</b>	<b>PBD anos</b>	<b>TIR %</b>
HSV	17,39	271.726,49	5,73	23,76
B3	22,12	601.082,19	2,98	41,21

Embora o material isolante seja aplicado unicamente em algumas superfícies (paredes leste, oeste e cobertura), ao calcular a economia em função dos custos com a energia elétrica economizada e o valor a ser pago no primeiro ano na tarifa HSV é alcançada uma economia monetária de 17,39 %, e na tarifa B3 a economia monetária alcança 22,12 %. Ambas as economias

são consideradas satisfatórias, principalmente considerando-se outros benefícios não avaliados neste estudo, tais como preservação do meio ambiente, isolamento acústico e conservação do telhado.

### 4.3.3 Economia Conjunta com MCE-01 e MCE-02

Com o intuito de conseguir uma edificação eficiente e que também proporcione uma economia energética e monetária no seu funcionamento, recorre-se à avaliação econômica das duas medidas em conjunto (iluminação natural e isolamento térmico) para analisar a viabilidade de aplicação.

Os custos de obra física para implementação das duas medidas em conjunto no M\_01, são de R\$ 240.761,50 aproximadamente. Com este investimento são calculados os indicadores econômicos.

Feita a análise com tarifa HSV, alcançou-se uma economia em custos de energia consumida de R\$ 9.894,35 no primeiro ano, equivalente a 19,79 % do valor pago pelo M\_01. Realizando a avaliação com tarifa para o grupo B3, é registrada uma economia monetária de R\$ 16.836,32 no primeiro ano, correspondente a 21,23 % do total pago. Destaca-se que os custos de manutenção incluídos são baixos, pois limitam-se à limpeza periódica do material translúcido durante o período de análise. A Tabela 4.4 apresenta os resultados obtidos com os cálculos dos indicadores econômicos, para as tarifas HSV e B3.

Tabela 4.4. Economia com o uso de isolante térmico e iluminação natural.

<b>Tarifa</b>	<b>Economia</b>	<b>VPL</b>	<b>PBD</b>	<b>TIR</b>
	%	R\$	anos	%
HSV	19,79	114.511,43	19,19	6,77
B3	21,23	372.989,15	12,68	11,54

O conjunto de estratégias para isolamento térmico e aproveitamento da iluminação natural, alcança uma economia de 19,79 % com tarifa HSV para o primeiro ano, e 21,23 % com a tarifa para o grupo B3, também no primeiro ano. Percebe-se que com a instalação das medidas conjuntas, o investimento inicial das estratégias para aproveitamento da iluminação natural é recuperado com a economia gerada quando instalado o isolante térmico. Os resultados comprovam a viabilidade de aplicação de duas MCE em conjunto.

### 4.3.4 Economia com Sistemas Fotovoltaicos

#### 4.3.4.1 Economia com diminuição da carga térmica

Nessa análise são avaliados os benefícios relacionados à diminuição da carga térmica da edificação, derivada da instalação de sistemas fotovoltaicos no beiral e na cobertura (S01 e S02). Isto é, sem desconto da energia elétrica produzida pelos SFCR.

Este modelo é chamado de edificação completa, ou M\_02, por se tratar do modelo base com todas as MCE aplicadas (iluminação natural, isolamento térmico, BIPV e BAPV) e considerando que é a máxima economia que pode ser obtida no modelo específico.

Com um investimento baixo na estrutura de suporte, a diferença de energia paga antes da instalação do BIPV e do BAPV quando analisada com tarifa HSV é de R\$ 11.585,57, ou seja, 23,17 % do valor pago pelo M\_01.

Analisada com valores da tarifa B3 o M\_02 obteve uma economia de R\$ 19.778,48, equivalente a 24,95 % sobre o valor pago em total de energia elétrica pelo modelo M\_01.

Na avaliação do M\_02 são obtidos os valores apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5. Economia com o conjunto de MCE aplicadas.

Tarifa	Economia %	VPL R\$	PBD anos	TIR %
HSV	23,17	175.445,30	17,12	8,04
B3	24,95	480.501,01	11,14	13,20

Realizada a análise para a tarifa HSV, obteve-se uma economia de 23,17 % em diminuição dos custos de energia com relação ao M\_01 e um PBD de 17,12 anos. Já com tarifa B3, a economia é de 24,95 % e o retorno do investimento diminui para 11,14 anos. Estes resultados são considerados favoráveis para a aplicação das MCE estabelecidas no estudo e comprovam que a edificação recebe benefícios térmicos dos sistemas instalados.

#### 4.3.4.2 Economia com a produção de energia

No presente estudo opta-se por usar o valor médio cobrado pelas empresas locais de venda e instalação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, que é de R\$ 4,50/Wp, incluindo todos os equipamentos e materiais e a instalação (*turnkey*). Considera-se na presente análise econômica duas substituições dos inversores para cada sistema, a primeira em dez anos e a segunda em vinte anos. Os resultados dos cálculos são mostrados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6. Economia com energia produzida.

Tarifa	Economia %	VPL R\$	PBD anos	TIR %
HSV	44,96	453.817,98	13,67	10,70
B3	51,67	1.142.201,52	8,01	17,73

Descontando a energia produzida pelos sistemas fotovoltaicos instalados na edificação (S01 a S11), quando analisada com tarifa HSV, consegue-se diminuir os custos em energia elétrica em 44,96 % e uma recuperação do investimento em 13,67 anos. Quando analisada com tarifa do grupo B3, esta economia alcança 51,67 % e diminui o PBD para 8,01 anos. Com esses resultados percebe-se os benefícios obtidos na diminuição no consumo de energia e a importância dos sistemas de geração de energia em termos de valor evitado.

#### 4.3.4.3 Variações segundo tarifação

Na Figura 4.1 mostra-se o saldo do VPL ao longo de 25 anos para a MCE-01 aplicada para proporcionar iluminação natural. Os valores apresentados referem-se unicamente a custos evitados em energia elétrica para iluminação artificial.

A Figura 4.2 mostra o saldo do VPL para as duas formas de tarifação da energia elétrica total consumida (estrutura tarifária Horossazonal Verde e convencional Grupo B3) para a MCE-02 (isolante térmico), e a Figura 4.3 mostra o VPL para as duas medidas em conjunto (MCE-03). Já na Figura 4.4 o saldo é mostrado adotando-se as MCE conjuntamente: aproveitamento de iluminação natural, isolante térmico, e sistemas fotovoltaicos na edificação (M\_02), e a Figura 4.5 mostra o VPL do M\_02 descontando a energia produzida pelos sistemas fotovoltaicos.

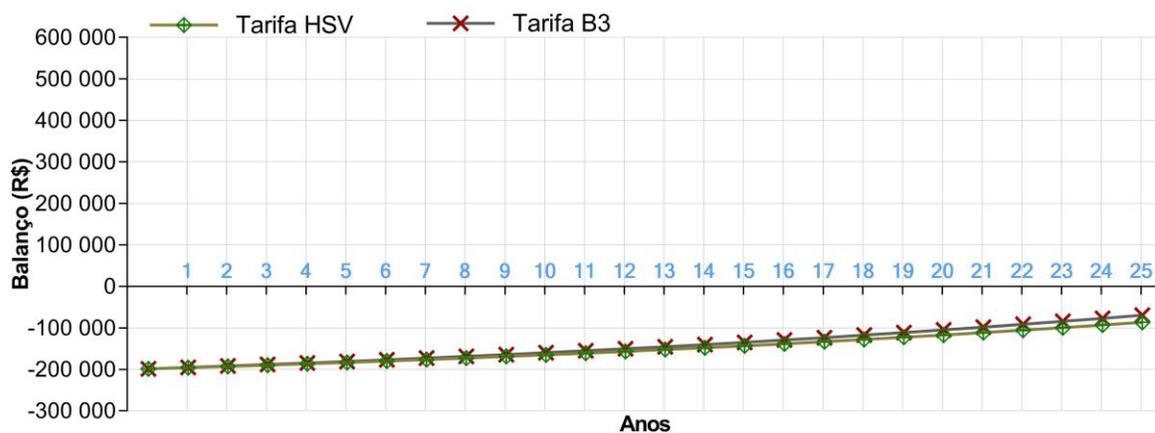


Figura 4.1. VPL para a medida de aproveitamento de iluminação natural.

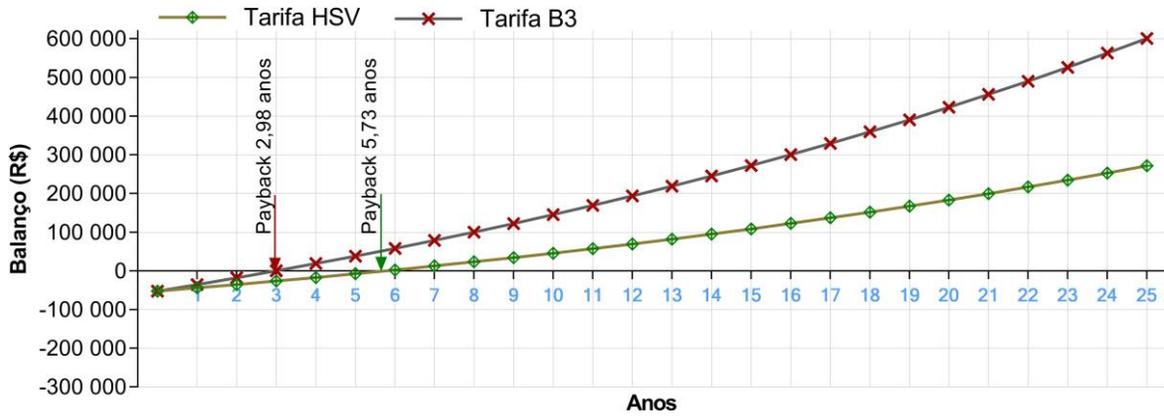


Figura 4.2. VPL para a medida de isolamento térmico.

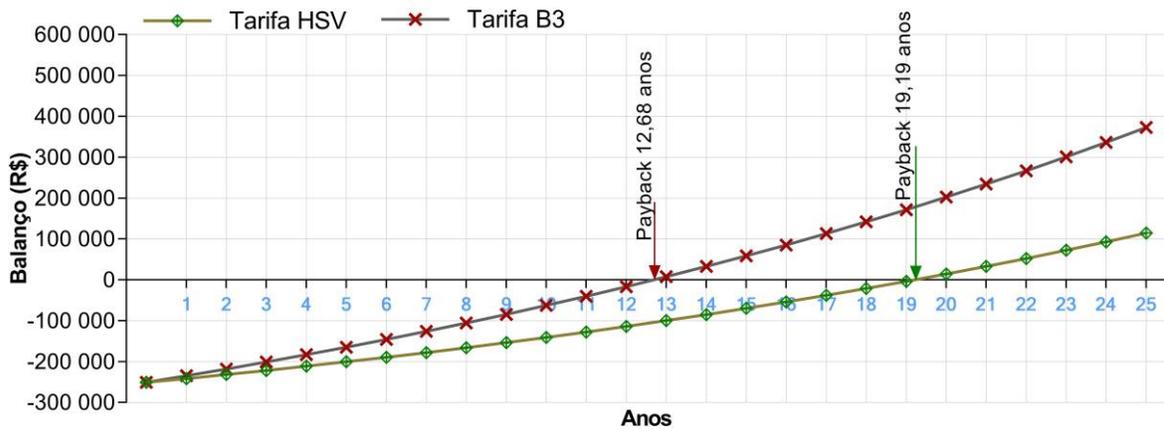


Figura 4.3. VPL para o conjunto de medidas de iluminação e isolamento.

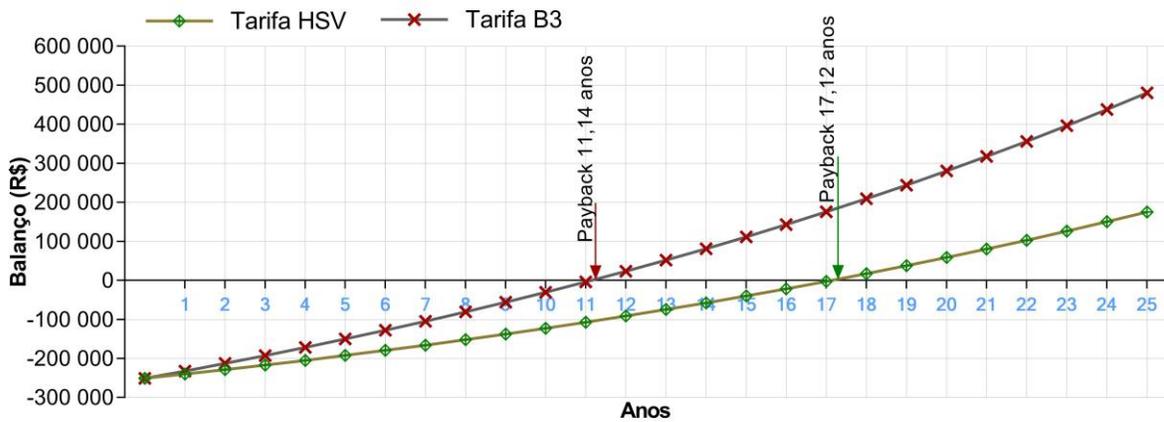


Figura 4.4. VPL para as medidas aplicadas em conjunto, incluindo BAPV e BIPV.

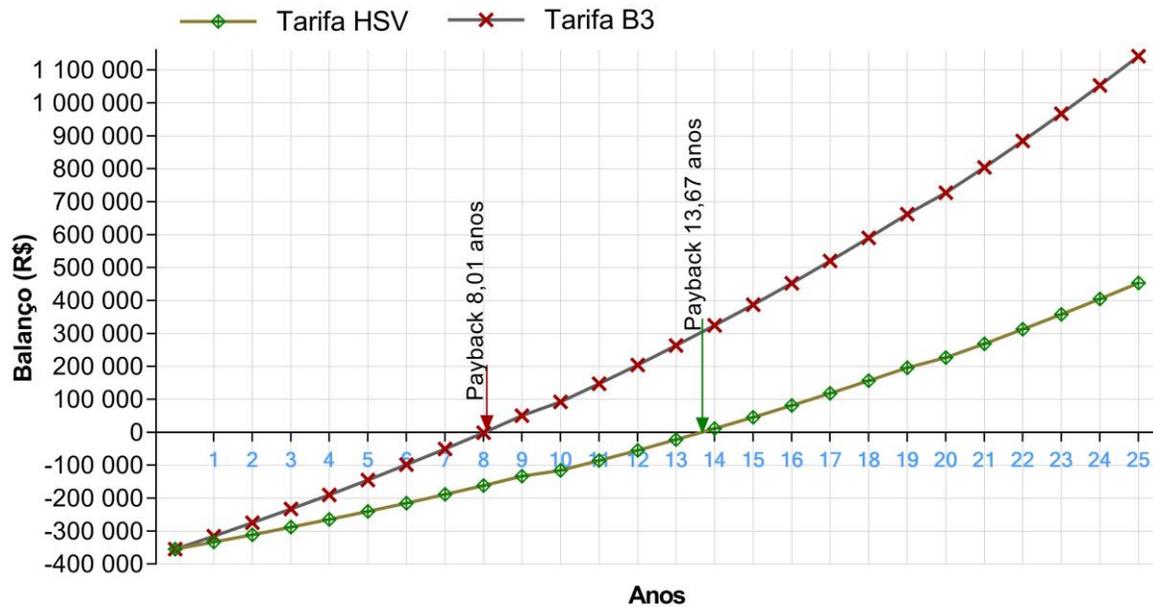


Figura 4.5. VPL para as medidas aplicadas em conjunto, com desconto da energia produzida.

Identificando-se o período de retorno do investimento (*payback*) em cada caso, torna-se mais atrativa a viabilidade para a edificação com tarifação pelo grupo B3, com um *payback* de 8 anos com todas as medidas em conjunto e aproveitamento da geração fotovoltaica. Já o atendimento da edificação pela tarifa Horossazonal Verde apresenta resultados menos atraentes, devido ao menor custo de energia elétrica consumida no horário fora de ponta.

#### 4.4 SIMULAÇÃO PARA AS CAPITAIS DA AMAZÔNIA LEGAL BRASILEIRA

A Região Amazônica apresenta características geográficas e climáticas similares em todos os seus estados, e são identificadas com base no arquivo climático e resumidas no apêndice. Com a finalidade de conhecer a replicabilidade de projetos similares na Região, o modelo da edificação em estudo com todas as MCE aplicadas (M\_02) é simulado para cada capital dos nove estados que compõem a Amazônia Legal Brasileira.

De posse das características peculiares de cada cidade, como custos de obra civil (SINAPI, 2018), arquivo climático (LABEEE, 2015), e as tarifas praticadas pelas concessionárias locais para o grupo B3, realizaram-se as simulações e estudos de viabilidade do modelo na região.

#### 4.4.1 Custo de Obra Civil

Os valores totais da obra do modelo completo da edificação em cada estado e a percentagem que representa o custo correspondente da implementação de cada MCE, em relação ao valor total da obra, são calculados e apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7. Custo total da obra civil e MCE.

	AC	AM	AP	MA	MT	PA	RO	RR	TO
Vr. total (x10 <sup>3</sup> R\$)	3.368	3.051	2.701	2.773	2.972	3.265	3.084	3.071	2.956
MCE-01 (%)	3,86	4,32	4,21	4,45	4,44	6,06	4,24	4,30	4,36
MC-02 (%)	1,89	2,18	2,16	1,80	2,03	1,59	1,98	1,95	1,72
MCE-03 (%)	5,75	6,49	6,38	6,26	6,47	7,65	6,22	6,27	6,08

#### 4.4.2 Custo de Energia Elétrica

Para realizar a simulação dos custos em energia elétrica em cada capital, é usada a tarifa do grupo B3, vigente para o ano de 2017 com as diferentes alíquotas tributárias praticadas em cada estado e adotadas de BRITO (2017). Busca-se a obtenção de custos mais aproximados para avaliar a viabilidade de implantação na Região.

A Tabela 4.8 apresenta um resumo das simulações realizadas, onde são avaliados diversos cenários com as MCE aplicadas em todas as capitais dos estados da Região Amazônica Brasileira.

Tabela 4.8. Resumo dos cenários simulados para 9 capitais da Amazônia Legal Brasileira.

		AC	AM	AP	MA	MT	PA	RO	RR	TO
		Rio Branco	Manaus	Macapá	São Luís	Cuiabá	Belém	Porto Velho	Boa Vista	Palmas
<b>Tarifa</b>	R\$/kWh	0,510	0,604	0,537	0,561	0,568	0,599	0,494	0,457	0,605
<b>Média de tributos</b>	%	30,50	30,50	17,50	35,50	32,50	32,39	22,40	22,40	30,50
<b>Irradiação global</b>	kWh/m <sup>2</sup>	1.633,76	1.721,02	1.497,46	1.881,77	1.842,12	1.587,62	1.514,74	1.648,76	1.632,42
<b>Cenário 1: Modelo base</b>										
<b>Consumo antes</b>	kWh	89.871,4	100.534,7	90.575,99	96.521,17	96.828,21	99.979,71	91.015,5	97.419,38	93.388,93
<b>Cenário 2: MCE para aproveitamento da iluminação natural</b>										
<b>Iluminação antes</b>	kWh	16.404,5	16.404,47	16.404,47	16.404,47	16.404,47	16.404,47	16.404,47	16.404,47	16.404,47
<b>Iluminação depois</b>	kWh	11.975,2	11.975,23	11.975,23	11.975,23	11.975,23	11.975,23	11.975,23	11.975,23	11.975,23
<b>Redução anual</b>	R\$	2.947,5	3.493,53	2.794,7	3.336,37	3.334,91	3.512,54	2.678,16	2.476,73	3.496,99
<b>Cenário 3: MCE Isolamento térmico</b>										
<b>Consumo depois</b>	kWh	71.410,5	77.596,7	73.830,57	75.893,29	73.274,05	77.860,6	72.417,01	75.862,85	72.005,48
<b>Redução anual</b>	%	20,54	22,82	18,49	21,37	24,33	20,43	20,43	22,13	22,90
<b>TIR</b>	%	26,89	33,89	24,57	33,44	35,69	41,21	25,26	26,58	39,84
<b>Payback</b>	anos	4,94	3,75	5,50	3,81	3,52	2,98	5,32	5,01	3,13
<b>Cenário 4: MCE conjunta de iluminação e isolamento</b>										
<b>Consumo depois</b>	kWh	71.519	79.000,9	73.716,2	77.385,78	75.367,05	78.749,48	72.653,85	77.153,78	73.635,04
<b>Redução anual</b>	%	20,42	18,61	18,61	19,83	22,16	21,23	20,17	20,80	21,15
<b>TIR</b>	%	10,95	14,03	10,57	13,24	13,77	11,54	10,02	10,15	14,16
<b>Payback</b>	anos	13,31	10,45	13,74	11,09	10,65	12,68	14,39	14,23	10,35
<b>Cenário 5: MCE conjunta de iluminação, isolamento e BIPV/BAPV</b>										
<b>Consumo depois</b>	kWh	67.941,8	75.238,0	70.261,34	73.669,63	71.375,43	75.039,47	69.134,98	73.511,73	70.024,89
<b>Redução anual</b>	%	24,40	25,16	22,43	23,68	26,29	24,95	24,04	24,54	25,02
<b>TIR</b>	%	12,77	15,95	12,45	15,29	15,79	13,20	11,74	11,77	16,18

<b>Payback</b>	anos	11,50	9,11	11,80	9,54	9,21	11,14	12,48	12,45	8,97
<b>Cenário 6: MCE conjunta de iluminação, isolamento e BIPV/BAPV + SFCRs</b>										
<b>Geração anual FV</b>	kWh	23.407,2	24.925,66	22.051,79	26.965,21	25.898,5	26.721,76	21.800,77	23.951,51	23.304,85
<b>Yf</b>	kWh/kWp	1.055,61	1.124,09	994,49	1.216,07	1.167,97	1.205,09	983,17	1.080,16	1.051,00
<b>PR</b>	%	64,61	65,32	66,41	64,62	63,40	75,91	64,91	65,51	64,38
<b>Consumo depois</b>	kWh	44.534,6	50.312,4	48.209,54	46.704,42	45.476,93	48.317,71	47.334,21	49.560,22	46.720,04
<b>Redução anual</b>	%	50,45	49,96	46,77	51,61	53,03	51,67	47,99	49,13	49,97
<b>TIR</b>	%	15,98	19,43	15,24	27,53	26,76	17,73	20,02	20,12	27,19
<b>Contribuição do FV</b>	%	34,45	33,13	31,39	36,60	36,28	35,61	31,53	32,58	33,28
<b>Payback</b>	anos	8,97	7,21	9,63	4,77	4,93	8,01	6,93	6,89	4,84

Os valores ressaltados na cor verde representam os valores mais favoráveis ao cenário correspondente, e os valores ressaltados na cor amarela representam os valores mais altos (menos favoráveis) para cada cenário.

Nota-se que para as capitais onde há maior incidência de radiação solar, embora o consumo de energia seja maior, a aplicação de material isolante térmico em determinadas superfícies se apresenta como uma solução adequada. A cidade de Belém-PA é a localidade mais favorável para o uso de material isolante térmico, pois o retorno do investimento se dá em um tempo menor (2,98 anos).

Para o cenário 6, há uma diferença na atratividade entre as cidades de Macapá e São Luís, com um retorno de investimento com uma diferença aproximada de 4,86 anos. A cidade de Macapá apresenta a tarifa menor de toda a região, a menor tributação e a menor radiação global. Estes fatores são determinantes para aumentar o tempo de retorno do investimento, já que também é uma das cidades com mais baixa geração de energia pelos SFCR. A cidade de São Luís com maior geração fotovoltaica e alto custo tarifário, converte-se na cidade mais adequada para implantação de projeto similares ao cenário 6 simulado. Entretanto, uma contribuição do sistema fotovoltaico superior a 31 % em todas as cidades, torna interessante o investimento.

A análise, conforme explicado, foi realizada para 6 cenários, variando-se as condições climáticas e tarifárias para cada cidade, mantendo as demais condições inalteradas. A Figura 4.6 mostra o VPL para a cidade de Belém (referência) e também para São Luís e Macapá no cenário 6, onde são avaliadas as MCE e a energia produzida pelos sistemas fotovoltaicos. A figura apresenta também o período de retorno do investimento para cada cidade. As cidades apresentadas são consideradas, respectivamente, o melhor e o pior caso para o cenário 6.

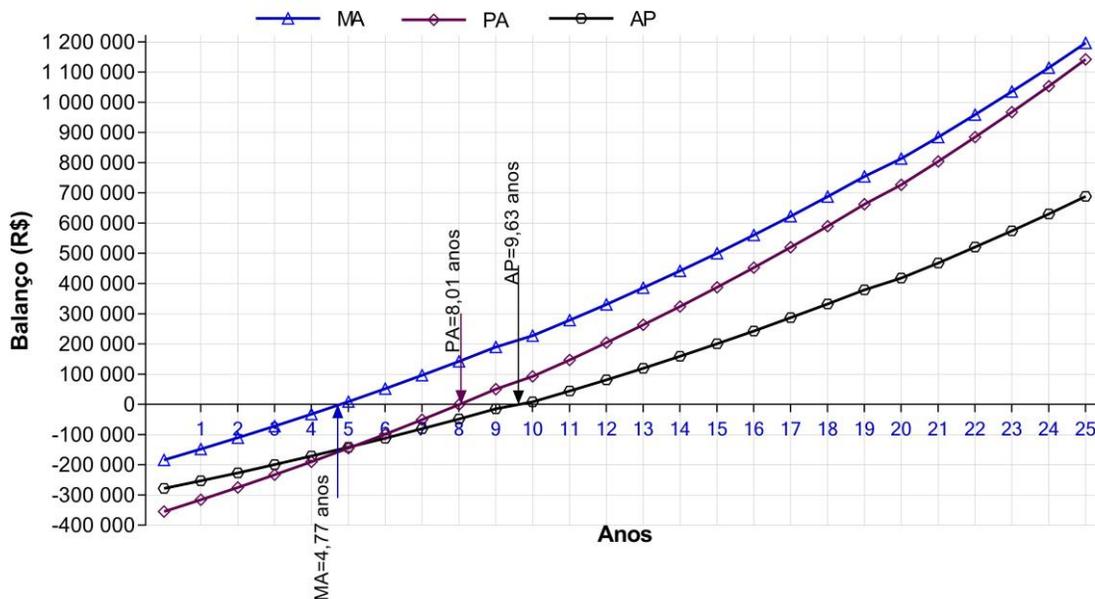


Figura 4.6. VPL para o cenário 6 em três capitais.

A Figura 4.7 apresenta o comportamento do PBD, da produtividade do sistema fotovoltaico, da tarifa praticada pela concessionária local para o grupo B3, e a contribuição do sistema fotovoltaico no primeiro ano. Dentro de um período de avaliação de 25 anos, o *payback* alcança um valor de 4,77 anos para a localidade de São Luís-MA, onde o retorno do investimento ocorre em um tempo menor. A cidade de Macapá-AM mostrou um período de retorno maior que o restante das cidades, de 9,63 anos, tornando a cidade menos atraente para esse tipo de investimento.

Nas análise percebe-se que existe uma relação direta para o retorno do investimento com a produtividade do sistema fotovoltaico, o valor da tarifa e a redução do consumo de energia elétrica proporcionado pelas MCE.

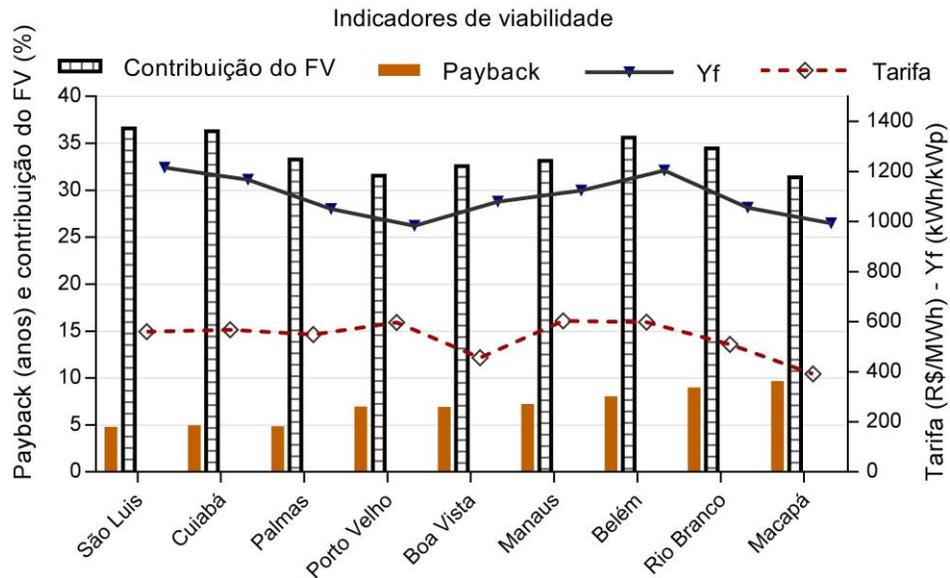


Figura 4.7. Simulação para as nove capitais da Região Amazônica Brasileira.

## 4.5 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

A solução energética para uma edificação, resultado da combinação de medidas e respectivo nível de eficiência alcançado, está em função das variáveis associadas a cada uma das medidas que compõem a solução, sendo necessário avaliá-las segundo dois critérios: impacto energético e impacto econômico. Para isto, a avaliação econômica mostra-se como uma importante ferramenta, a fim de mostrar se o investimento traz benefícios reais, seja de longo ou curto prazo.

Pelos estudos neste capítulo conclui-se que existe a viabilidade econômica da implantação da MCE em conjunto para todas as capitais da Amazônia Legal Brasileira. Além disso, há a expectativa do cenário se tornar mais atrativo economicamente, dada a redução gradativa dos custos de materiais e equipamentos de sistemas fotovoltaicos que o mercado brasileiro está

experimentando. Mas ainda é necessário superar algumas barreiras financeiras, por meio de incentivos que poderiam ser concedidos por parte do governo brasileiro, como a redução de impostos na aquisição dos equipamentos e a diminuição no custo final dos materiais importados, sendo fatores importantes para melhorar a atratividade econômica em diferentes subgrupos e modalidades tarifárias, assim como para induzir o desenvolvimento e a implantação de uma maior quantidade de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica em unidades consumidoras na Amazônia.

## CONCLUSÕES

No Brasil, as edificações comerciais, públicas e residenciais consomem cerca de 50 % de energia elétrica total. Este panorama ajuda a entender que o uso adequado de energia em edificações é uma das questões-chaves para enfrentar o desafio das mudanças climáticas.

Este trabalho investigou as possibilidades e as limitações da aplicação de Medidas de Conservação de Energia para estimar o potencial que cada medida tem, seja no âmbito energético e de energia conservada ou em custos de obra e economia monetária.

Como estudo de caso foi adotada a edificação do Laboratório de Energias Renováveis e de Eficiência Energética, do Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas, da UFPA, localizada na cidade de Belém-PA, na Região Amazônica Brasileira, modificado com características padrão comerciais, porém de baixa eficiência para consumo de energia. Posteriormente, no modelo base são aplicadas diversas MCE e avaliadas do ponto de vista térmico, energético e econômico, para determinar a viabilidade tanto em energia conservada quanto em custos de obra e de investimento.

Para este fim, adotou-se uma abordagem comparativa de investigação-ação, buscando que a edificação alcançasse um balanço energético positivo (nZEB), ou então com baixo consumo de energia (LEB). As MCE são aplicadas sobre um modelo base e são avaliados os impactos de cada uma delas no desempenho da edificação, através de simulações computacionais de autonomia de iluminação natural e termo-energética e/ou integradas. Cada análise baseou-se em simulações de um conjunto de elementos e/ou materiais aplicados, a fim de observar tendências de comportamento da edificação. A simulação termo-energética realizada no EnergyPlus, e de autonomia de iluminação natural realizada no Daysim/Radiance, revelaram que cada uma das medidas exerce uma influência importante sobre o desempenho da edificação e seus processos.

Os objetivos do trabalho foram cumpridos e as premissas e a hipótese foram comprovadas, visto que se obteve um panorama positivo quando avaliadas as possibilidades e as limitações de sistemas, materiais ou técnicas construtivas na edificação, no âmbito energético e econômico e as possibilidades de replicabilidade nas nove capitais dos estados da Região Amazônica Brasileira.

As medidas aplicadas ao modelo são referentes a: elementos e materiais para aproveitamento da iluminação natural no interior dos espaços; isolamento térmico e câmara de ar para modificar a transmitância térmica da envoltória; e aplicação de sistemas fotovoltaicos, tanto para geração de energia para atendimento das cargas, como para avaliar a influência nas cargas térmicas internas.

Para o aproveitamento da iluminação natural, são modificadas as janelas e adicionados elementos arquitetônicos na cobertura e materiais translúcidos nas circulações. Estas estratégias permitem que os usuários desfrutem dos benefícios da iluminação natural na maioria dos espaços. Das análises conclui-se que nos espaços que não têm aberturas de acesso ao exterior faz-se

necessário o uso de iluminação artificial, devido à quantidade de lux que atendem o plano de trabalho não ser suficiente para a realização dos trabalhos determinados para cada espaço. Nos resultados relativos ao consumo de energia, comprovou-se que há uma diminuição mensal de até 27 % no consumo de energia elétrica ativa usada para atender as necessidades de iluminação artificial nos espaços e horários em que a medida não consegue. Para os custos referentes a gastos unicamente com energia elétrica para iluminação, a economia alcança um valor de 33 % no primeiro ano. No entanto, com esta avaliação percebeu-se que com a implantação desta medida, houve aumento na carga térmica de modo geral.

Ressalta-se que ao realizar o cálculo do VPL e do PBD não foi registrada recuperação econômica do investimento, porém, adota-se como medida a ser levada em consideração, visto que os custos da implantação da medida em relação ao custo da obra total é desprezível, e obteve-se economia em energia usada para iluminação artificial e benefícios de conforto lumínico para os usuários.

Com relação ao isolamento térmico para as paredes leste e oeste e isolante e câmara de ar na cobertura, os resultados indicam que o uso do material isolante nas regiões de clima quente e úmido é viável quando relacionado à economia de energia em condicionamento de ar dos espaços. No entanto, destaca-se a importância da seleção adequada das superfícies onde serão aplicados, para evitar a formação de bolhas de calor dentro dos espaços construídos, pois para a zona bioclimática em que está localizada a edificação existe a necessidade de empregar paredes leves refletoras (com baixa resistência e absorvância térmica) nas demais superfícies da edificação para melhorar o processo de transferência de calor para o meio externo.

O uso de isolante térmico representa uma economia energética derivada da diminuição da carga térmica no interior dos espaços. Ao realizar a avaliação econômica, a edificação com a medida aplicada apresenta uma redução de custos no primeiro ano de 17,39 % na tarifa horossazonal verde e de 22,12 % quando aplicada a tarifa para o grupo B3. Esta redução é considerada satisfatória, devido ao restante de benefícios não avaliados, como preservação do meio ambiente, isolamento acústico e conservação do telhado ao longo da vida útil.

O estudo realizado sobre o isolamento térmico e a influência no desempenho da envoltória comprova a eficácia do uso do material. Ressalta-se a importância de usar o material unicamente em algumas superfícies da envoltória, para evitar criar obstáculos que impeçam os processos físicos inerentes à edificação, como resfriamento noturno, por exemplo.

O sistemas fotovoltaicos instalados na área do Laboratório alcançam uma produção de energia equivalente a 26,7 MWh/ano, que atende um média mensal de 36 % do consumo total da edificação construída. São SFCE que além de atender parte das cargas do prédio também são dedicados à realização de estudos e pesquisa.

Dos onze sistemas avaliados, unicamente dois estão incorporados ou adaptados à edificação. Assim, realizou-se uma análise do impacto no comportamento térmico dos espaços que estão sob

influência direta desses sistemas. Com base nas simulações realizadas, comprovou-se que o uso de sistemas fotovoltaicos (usando módulos fotovoltaicos como beiral de sombreamento e também adaptados sobre o telhado) reduz a demanda energética tanto pela carga térmica, reduzindo o fluxo de calor para o interior, quanto pela geração de energia. Assim, os sistemas fotovoltaicos instalados na cobertura apresentam uma câmara de ventilação entre a superfície do telhado e as costas do módulo, como uma opção recomendada para as edificações em regiões de clima quente, pois, tanto os módulos fotovoltaicos quanto a camada de ventilação, diminuem o fator de amortecimento térmico do conjunto, amenizando as variações térmicas tanto do telhado quanto dos módulos. Do mesmo modo, outro fator a ser considerado é a utilização de módulos fotovoltaicos nos beirais, havendo benefícios em relação à diminuição da carga térmica para resfriamento, pois protegem as paredes e aberturas da radiação solar. A aplicação dos sistemas adaptados e integrados à edificação comprova a importância da geração de energia e os efeitos térmicos positivos sobre as superfícies favorecidas.

A regulamentação vigente para avaliar o nível de eficiência energética de edificações comerciais, públicas e de serviço estabelece que sejam avaliados três sistemas: envoltória, iluminação artificial e condicionamento de ar. Após a conformação do modelo base e do modelo com todas as medidas em conjunto, procedeu-se à avaliação dos níveis de eficiência energética pelo método prescritivo do RTQ-C, denominada neste trabalho de análise estática, pois não depende de variáveis que mudam com o tempo. Os resultados determinam que o modelo base (M\_01) está classificado no nível E, pois sua envoltória não atende os pré-requisitos de transmitância térmica especificados no regulamento. Com a instalação das MCE, a edificação (M\_02) alcança o nível “A” de máxima eficiência e está apta para recebimento da ENCE nível A e Selo PROCEL EDIFICA.

Como conclusão geral, pode-se dizer que as MCE, seja em forma individual ou em conjunto, constituem-se em estratégias viáveis para aplicação em edificações cujo enfoque seja a economia energética e monetária. A diminuição do consumo de energia elétrica em sistemas HVAC apresenta-se como a maior vantagem obtida nos processos. No modelo M\_02, quando comparado com o modelo base, obteve-se uma diminuição em energia elétrica para sistemas HVAC de 42 % ao ano, considerando a geração dos SFCR. Em termos monetários o M\_02 registrou uma diminuição de custos de energia de 23,17 %, para a tarifa HSV e de 24,95 % para tarifa do grupo tarifa B3. De forma geral, a edificação real (M\_02) quando descontada a energia gerada pelos SFCR, obteve uma economia energética anual de 51,64 % com relação ao modelo base.

Evidências deste trabalho mostram que o uso de MCE em edificações em clima quente e úmido oferecem resultados consistentes, e são alternativas viáveis para diminuir o consumo de energia. Do mesmo modo, são estratégias aplicadas que melhoram o desempenho térmico, lumínico e energético da edificação sem sacrificar o conforto dos usuários, embora tenha sido comprovado que as ações para implementação de iluminação natural aumentam a carga térmica e, ao analisar o custo de implantação, verifica-se a necessidade de reavaliar outro tipo de estratégia

para proporcionar iluminação natural aos ambientes, sem prejudicar a avaliação econômica.

Neste contexto, foi comprovado que a mesma edificação com o conjunto de medidas aplicadas, quando inserida e simulada para as nove capitais dos estados que formam a Amazônia Legal Brasileira, apresenta resultados favoráveis, mostrando que pode ser replicada nas diversas cidades avaliadas. Seguindo as variáveis para cada cidade (custo de obra civil, clima e tarifação), os resultados mostram a cidade de São Luís - MA como a cidade que alcança um PBD menor, de 4,52 anos, para um período de avaliação de 25 anos. Já a cidade menos favorecida para recuperação do investimento e economia de energia é a cidade de Macapá - AP, com 9,63 anos. Ao realizar as simulações de seis cenários para as capitais da Amazônia Legal Brasileira, há o indicativo de viabilidade econômica das soluções e comprova-se a possibilidade de replicar as MCE em edificações com condições climáticas similares, levando em consideração as particularidades tarifárias.

Com base na investigação conduzida neste trabalho e em seus resultados, sugerem-se os seguintes trabalhos futuros:

- Implantação de SFCR na totalidade da cobertura da edificação, e avaliação do impacto no desempenho térmico e de fluxos de calor nas superfícies. A análise apresentada neste trabalho, refere-se unicamente à área dos SFCR existentes no Laboratório e que foram deslocados para a cobertura. A relação geradores/área do telhado, não apresentou variações significativas no desempenho térmico atual, no entanto, foi comprovado que os módulos fotovoltaicos instalados sobre superfícies exercem influência no comportamento térmico.

- O trabalho revela a contribuição da iluminação natural para a economia em consumo de energia para iluminação. Com base neste estudo, onde se percebe um aumento da carga térmica quando instalados os materiais analisados, propõe-se a avaliação de outros materiais semitransparentes com diferentes características, para estabelecer a comparação entre o desempenho térmico e lumínico. Entre esses materiais, sugere-se analisar também, módulos fotovoltaicos semitransparentes e a avaliação da viabilidade econômica.

- As fachadas norte e sul recebem a maior quantidade de irradiação durante os solstícios, contribuindo para o aumento das cargas térmicas das zonas em contato direto com o exterior. A proposta para posteriores estudos, trata-se de avaliar elementos de sombreamento nas aberturas envidraçadas, tais como brises móveis, vidros com diferentes coeficiente de sombreamento e fator solar, etc., e seus efeitos nas cargas térmicas internas e a iluminação natural.

- Recomenda-se a avaliação de ventilação mista: a ventilação natural como estratégia para a zona bioclimática 8 e sistemas ativos de condicionamento de ar, avaliando horas de conforto com ventilação quando usada como complemento.

## REFÊRENCIAS

ABNT. NBR 15220. Parte 3. Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. **Associação Técnica de Normas Brasileiras**, 2005.

ABNT. NBR ISO/CIE 8995-1. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 46, 2013.

AGUILAR, H. Projeto de uma Edificação Energeticamente Autônoma e Eficiente para uso como Laboratório de Energias Renováveis e de Eficiência Energética. **Universidade Federal do Pará**, 2004.

AGUILAR, H. M. C.; GALHARDO, M. A. B.; PINHO, J. A. T. Application of Energy Conservation Measures and Their Impact on the Thermal- Energetic Performance of a Building in the Brazilian Amazon Region: A Case Study. **Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME**, v. 140, n. 3, p. 1–13, 2018.

AKTACIR, M. A.; BÜYÜKALACA, O.; YILMAZ, T. A case study for influence of building thermal insulation on cooling load and air-conditioning system in the hot and humid regions. **Applied Energy**, v. 87, n. 2, p. 599–607, 2010.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; MORAES GONÇALVES, J. L. DE; SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

ANEEL. Resolução nº 112, de 18 de maio de 1999. , 1999.

ANEEL. Resolução Normativa Nº 414, de 2010. **Agência Nacional de Energia Elétrica**, p. 205, 2010.

ANEEL. Audiência Pública nº 042/2011. **Agência Nacional de Energia Elétrica**, 2011.

ANEEL. Resolução Normativa Nº 482 de 17 de abril de 2012. **Agência Nacional de Energia Elétrica**, 2012.

ANEEL. Resolução Normativa Nº 687 de 24 de Novembro de 2015. **Agência Nacional de Energia Elétrica**, 2015.

ANNEEL. Nota Técnica nº 0062/2018. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/consultas-publicas>>. Acesso em: 23/6/2018.

ASHRAE. Energy Efficiency Design of new Buildings except low-rise residential buildings. **American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers**, 1989.

ASHRAE. Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings (I-P Edition). **American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers**, v. 8400, p. 404–636, 2007.

ASHRAE. Handbook Fundamentals. **American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers**, 2009.

ASHRAE. Guide to Standard 189.1. Balancing Environmental Responsibility, Resource Efficiency and Occupant Comfort. **American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers**, v. 1, n. June, 2010.

ASHRAE. Guideline 14-2014 -- Measurement of Energy, Demand, and Water Savings. **American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers**, p. 146, 2014.

ATAM, E. Current software barriers to advanced model-based control design for energy-efficient buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 73, n. August 2016, p. 1031–1040, 2017.

ATECYR. Guia técnica de procedimentos y aspectos de la simulación de instalaciones térmicas en edificios. **Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración**, 2008.

AWAWDEH, S. A.; TWEED, P. C. Buildings' Energy Efficiency and Building Energy Codes: a Literature Review. **Jordan International Energy Conference. Ammam**, 2011.

BACEN. Banco Central do Brasil. Disponível em: <<http://www.bcb.gov.br/pt-br>>. Acesso em: 30/4/2018.

BARBOSA, C. F. DE O.; VERÍSSIMO, J. A.; LEMOS, J. P. A. Laboratório de Sistemas Híbridos de Energia e Minirredes. **VI Congresso Brasileiro de Energia Solar**, 2016.

BARBOSA, C. F. O.; CORRÊA, J. A. L.; A., V. J. P.; et al. Laboratory of Hybrid Systems and Mini-Grids. **33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition**, 2017.

BASTOS, T.; PACHECO, N.; NECHET, D.; ABRE DE SÁ, T. Aspectos Climáticos de Belém nos Últimos Cem Anos. **EMBRAPA**, 2002.

BELLIA, L.; PEDACE, A.; BARBATO, G. Lighting in educational environments: An example of a complete analysis of the effects of daylight and electric light on occupants. **Building and Environment**, v. 68, p. 50–65, 2013.

BELLIA, L.; PEDACE, A.; BARBATO, G. Daylighting offices: A first step toward an analysis of photobiological effects for design practice purposes. **Building and Environment**, v. 74, p. 54–64, 2014.

BOOSTANI, H.; MIRZAPOUR, E. Impact of external walls insulation location and distribution on energy consumption in buildings: A case study of Northern Cyprus. **European Online Journal of Natural and Social Sciences**, v. 4, n. 4, p. 737–741, 2015.

BOYANO, A.; HERNANDEZ, P.; WOLF, O. Energy demands and potential savings in European office buildings: Case studies based on EnergyPlus simulations. **Energy and Buildings**, v. 65, p. 19–28, 2013.

BRASIL. Lei Nº 8.631, de 4 de Março de 1993. Dispõe sobre a fixação dos níveis das tarifas para o serviço público de energia elétrica, extingue o regime de remuneração garantida e dá outras providências. **Brasil. Lex: Diário Oficial da União, Brasília**, p. 3220–3304, 1993.

BRASIL. Lei Nº 8.987, de 13 de Fevereiro de 1995. Dispõe sobre o regime de concessão e permissão da prestação de serviços públicos previsto no art. 175 da Constituição Federal, e dá outras providências. **Brasil. Lex: Diário Oficial da União, Brasília**, 1995a.

BRASIL. Lei Nº 9.074, de 7 de Julho de 1995. Estabelece normas para outorga e prorrogações das concessões e permissões de serviços públicos e dá outras providências. **Brasil. Lex: Diário Oficial da União, Brasília**, 1995b.

BRASIL. Decreto Nº 2.003, de 10 de Setembro de 1996. Regulamenta a produção de energia elétrica por Produtor Independente e por Autoprodutor e dá outras providências. **Brasil. Lex:**

**Diário Oficial da União, Brasília**, 1996.

BRASIL. Decreto N° 2.655, de 2 de Julho de 1998. Regulamenta o Mercado Atacadista de Energia Elétrica, define as regras de organização do Operador Nacional do Sistema Elétrico, de que trata a Lei n° 9.648, de 27 de maio de 1998, e dá outras providências. **Brasil. Lex: Diário Oficial da União, Brasília**, 1998.

BRASIL. Lei 10.295 de 17 de outubro de 2001. **Ministério de Minas e Energia**, p. 17–18, 2001a.

BRASIL. Decreto N° 4059 de 2001. , 2001b.

BRITO, A. U. Edificações energeticamente autônomas e eficientes. **PPGEE. Instituto de Tecnologia. UFPA.**, 2003.

BRITO, E. H. G. DE. Tarifas de distribuição de energia elétrica no Brasil: aperfeiçoamento da metodologia tarifária a partir de parâmetros de continuidade do serviço, sustentabilidade econômico-financeira e simplicidade regulatória. **PPGEE. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**, p. 349, 2017.

CAAMAÑO, E. Edificios Fotovoltaicos Conectados a la Red Eléctrica: caracterización y análisis. **Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación. Universidad Politécnica de Madrid**, 1998.

CARLO, J. C. Desenvolvimento de Metodologia de Avaliação da Eficiência Energética do Envolvimento de Edificações Não-residenciais. **Universidade Federal de Santa Catarina, PPGE**, 2008.

CAVA, M. F. DELLA; BERKELEY, L.; WIEL, S.; PHUKET, S. R. N. Supporting a network for energy efficiency labels and standards programs in developing countries. **2nd International Conference on Energy Efficiency in Household Appliances and Lighting held in Naples, Italy**, 2000.

CAVALCANTE, R. L. Análise operacional de dois sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica do Campus Universitário da UFPA, na cidade de Belém/PA. **Universidade Federal do Pará. ITEC**, 2011.

CB3E; INMETRO; ELETROBRAS. Manual Para Etiquetagem de Edificações públicas. **ELETROBRAS**, , n. 2, 2016.

CELPA. Modalidade Tarifária. Disponível em: <<http://www.celpa.com.br/corporativo/informacoes/cobranca-de-tarifas>>. 2017.

CHIVELET, M.; SOLLA, I. **Técnicas de Vedação Fotovoltaica na Arquitetura**. 2010.

CHWIEDUK, D. Towards Sustainable-energy Buildings. **Applied Energy** 76, v. 1–3, p. 211–217, 2003.

CLASP. Standards and Labelling Programs Worldwide. **The Collaborative Labeling and Appliance Standards Program**, 2007.

CORREA, J.; GALHARDO, M.; VERÍSSIMO, J. P.; HIDAI ISRAEL; LEMOS LOBATO. Implantação e avaliação de desempenho de dois geradores fotovoltaicos conectados diretamente no barramento c.c. do laboratório de sistemas híbridos/minirredes (GEDAE/UFPA). **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar**, 2018.

CRAWLEY, D. B. Building energy tools directory. Office of Building Technology, State and Community Programs. **US Department of Energy**, 1996.

CRAWLEY, D. B.; HAND, J. W.; KUMMERT, M.; GRIFFITH, B. T. Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. **9th IBPSA Conference; Montreal**, , n. July, 2005.

CREDER, H. **Instalações hidráulicas e sanitárias**. 6th ed. Brasil, 2006.

DERINGER, J. J. Transferred Just on Paper? Why Doesn't the Reality of Transferring/Adapting Energy Efficiency Codes and Standards Come Close to the Potential? **ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings**, , n. August, 2004.

DIDONÉ, E. L. A influência da luz natural na avaliação da eficiência energética de edifícios contemporâneos de escritórios em Florianópolis/SC. **UFSC. Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo**, p. 179, 2009.

DOMINGUEZ, A.; KLEISSL, J.; LUVALL, J. C. Effects of solar photovoltaic panels on roof heat transfer. **Solar Energy**, v. 85, n. 9, p. 2244–2255, 2011.

DONG, K. Y.; SUN, R. J.; LI, H.; JIANG, H. D. A review of China's energy consumption structure and outlook based on a long-range energy alternatives modeling tool. **Petroleum Science**, v. 14, n. 1, p. 214–227, 2017.

DOU. Diário Oficial da Uniao. Disponível em: <<http://portal.in.gov.br/>>. Acesso em: 4/2/2015.

DYLEWSKI, R.; ADAMCZYK, J. Economic and environmental benefits of thermal insulation of building external walls. **Building and Environment**, v. 46, n. 12, p. 2615–2623, 2011.

EERE. Building Energy Software Tools Directory. Disponível em: <<https://www.buildingenergysoftwaretools.com/>>. Acesso em: 26/6/2018.

EIFFERT, P.; KISS, G. J. Designs for Commercial and Institutional Structures A Sourcebook for Architects. **Department of Energy's**, 2000.

ELETROBRÁS. Avaliação do Mercado de Eficiência Energética no Brasil. Pesquisa de posse de Equipamentos e Hábitos de Uso. **PROCEL**, 2007.

ELETROBRÁS. Equipamentos. **PROCEL EDIFICA**, 2014.

ENERGYPLUS. Engineering Reference. The Reference to EnergyPlus Calculations. **U.S. Department of Energy**, 2011.

ENERGYPLUS. Input/output reference: The encyclopedic reference to EnergyPlus input and output. **U.S. Department of Energy**, 2013.

ENERGYPLUS. Input Output Reference. **U.S. Department of Energy**, , n. c, p. 1996–2016, 2016b.

EPE. Balanço Energético Nacional. **Ministério de Minas e Energia**, p. 292, 2017.

EUR-LEX. Directiva 2012/27/UE del parlamento Europeo y del Consejo relativa a la Eficiencia Energética. **Diario Oficial de la Unión Europea**, p. 1–56, 2012.

EXXONMOBIL. 2017 Outlook for Energy: A View to 2040. **EXXON Mobil Corporation**,

p. 1–50, 2017.

FERNÁNDEZ, E.; PAULA, M.; RANGEL, M.; EXPÓSITO, F. Simulación dinámica de luz natural: Nuevas técnicas e indicadores para la reducción del consumo energético en iluminación. **Proceedings of the II International and IV National Congress on Sustainable Construction and EcoEfficient Solutions**, p. 739–752, 2014.

FERTELLI, A. Determination of optimum insulation thickness for different building walls in turkey. **Transactions of Famena**, v. 37, n. 2, p. 103–113, 2013.

FINLAY, J. F. Valuation Methods for Building-Mounted Solar Photovoltaic Systems Expert Analysis. **Institute for Building Efficiency**, , n. March, 2013.

FROTA, A. B. **manual de conforto térmico**. 2005.

FUMO, N. A review on the basics of building energy estimation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 31, p. 53–60, 2014.

GARCIA, M. DE C. DOS S. Simulação dinâmica de edifícios com componentes integrando PCM. **Universidade De Aveiro**, 2013.

HENNINGER, R. H.; WITTE, M. J. EnergyPlus Testing with ANSI/ASHRAE Standard 140-2001 (BESTEST). **Department of Energy**, , n. June, 2004.

HENSEN, J. L. M.; LAMBERTS, R. **Building performance simulation for design and operation**. 2011.

HITCHIN, R. Can building codes deliver energy efficiency? Defining a best practice approach. **RICS, London**, 2008.

HONG, T.; CHOU, S. K.; BONG, T. Y. A design day for building load and energy estimation. **Building and Environment**, v. 34, n. 4, p. 469–477, 1999.

HUI, S. C. M. Using Performance-Based Approach in Building Energy Standards and Codes. **Proc. of the Chongqing-Hong Kong Joint Symposium**, , n. July, p. 8–10, 2002.

INPE. **Atlas de Energia Solar**. 2017.

JACOBS, P.; HENDERSON, H. State-of-the-Art Review, Whole Building, Building Envelope, HVAC Component and System Simulation and Design Tools. **ARTI-21CR/605-30010/30020-01**, 2002.

JUNIOR, L. R. T. Desenvolvimento de um sistema de monitoração para avaliação de desempenho de dois sistemas fotovoltaicos conectados à rede de diferentes configurações. **Engenharia De Controle E Automação. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará**, 2017.

KAPSALIS, V. C.; VARDOULAKIS, E.; KARAMANIS, D. Simulation of the cooling effect of the roof added photovoltaics. **Advances in Building Energy Research**, v. 8, n. 1, p. 41–54, 2012.

KAYNAKLI, O. A review of the economical and optimum thermal insulation thickness for building applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 1, p. 415–425, 2012.

KRIEDER, J; RABL, A. Heating and Cooling of Buildings - Design for Efficiency, Mechanical Engineering Series. **McGraw-Hill International Editions**, 1994.

LABEEE. Arquivos climáticos em formato EPW. 2015. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br>>. Acesso em: 6/2/2017.

LEAL, A. M. Monitoração e Análise de um Sistema de Geração Individual com Fonte Intermitente do Tipo Fotovoltaico. **Faculdade de Engenharias Elétrica e Biomédica. Universidade Federal do Pará**, 2015.

LIMA, K. M. DE. Avaliação de sistemas de janela para suporte a decisões de projeto quanto ao equilíbrio de ganhos de luz e calor. **Instituto de Arquitetura e Urbanismo. Universidade de São Paulo**, 2016.

LONGO, F.; FRANÇA, R.; MONTEIRO, M.; BLASQUES, L. Integrated design approach to apply PV in building projects. **Energy Forum. Advanced Building Skins**, 2013.

LOPES, A. DO C. P.; OLIVEIRA FILHO, D.; ALTOE, L.; CARLO, J. C.; LIMA, B. B. Energy efficiency labeling program for buildings in Brazil compared to the United States' and Portugal's. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 66, p. 207–219, 2016.

LUTZ, W. F. Normalización Energética en el Grupo Andino. **PAIE - Programa Andino de Integración Energética, Lima**, 1996.

MACÊDO, W. N.; ANDRÉ, M.; GALHARDO, B.; RENAN, A.; MANITO, A. Avaliação De Desempenho Operacional Do Primeiro Sistema Fotovoltaico Conectado À Rede Elétrica E. **IV ISES\_CLA. XVII SPES**, p. 1–5, 2010.

MÂCEDO, W. N.; PINTO, G. F.; BARROS, G. M. A.; PINHO, J. T.; ZILLES, R. The first grid-connected PV application in the Amazon Region. **23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference**, p. 3468–3471, 2008.

MAIA, K. Análise de desempenho de um sistema fotovoltaico domiciliar de pequeno porte operando com diferentes equipamentos. **PPGEE. Instituto de Tecnologia. UFPA.**, 2015.

MANGAN, S. D.; KOÇLAR, O. G. Energy, economic and environmental analyses of photovoltaic systems in the energy renovation of residential buildings in Turkey. **ITU A/Z**, v. 13, n. 2, p. 5–22, 2016.

MANITO, A. Desenvolvimento e Implantação de um Sistema para Monitoramento do Desempenho Energético de Edificações. **PPGEE. Instituto de Tecnologia. UFPA.**, 2012.

MATOS, E. O. DE. Análise não paramétrica para identificação de fontes de distorções harmônicas em sistemas de energia elétrica: um estudo aplicado no Campus Universitário do Guamá da Universidade Federal do Pará. **PPGEE. Instituto de Tecnologia. UFPA.**, 2016.

MDIC. Portaria n. 372, de 17 de setembro de 2010. **Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior**, 2010.

MDIC. Portaria n. 17, de 16 de janeiro de 2012. **Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior**, 2012a.

MDIC. Portaria n. 18, de 16 de janeiro de 2012. **Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior**, 2012b.

MDIC. Portaria n. 299, de 19 de junho de 2013. **Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior**, 2013a.

MDIC. Portaria n.º 50 de 01 de fevereiro de 2013. **Ministério do Desenvolvimento,**

**Indústria e Comércio Exterior**, 2013b.

MENDES. Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil. **Ambiente Construído**, v. 5, p. 47–68, 2005.

MILNE, M. Climate Consultant 6.0. , 2017.

MIRABEAU, T. Avaliação de Políticas Públicas para Redução da Emissão de Gases de Efeito Estufa em Edificações. **UNEP. United Nations Environment Programme**, 2009.

MME; EPE. Plano Nacional de Energia 2030. **Ministério de Minas e Energia**, 2007.

NABIL, A.; MARDALJEVIC, J. Useful daylight illuminances: a new paradigm for assessing daylight in building. **Lighting Research and Technology**, v. 37, n. 1, p. 41–59, 2005.

NBIS. BLAST - Building Loads Analysis and System Thermodynamics. **National Institute of Building Sciences**, 2013.

NESLER, C.; PALMER, A. S. Absolute Zero. Net Zero Energy Commercial buildings - an inspiring vision for today. **Johnson Controls, Inc.**, 2009.

NICOLAU, M. F.; CHVATAL, K. M. S. Análise de programas computacionais simples de apoio a projetos bioclimáticos. **Encac 2010**, , n. 1, 2010.

OECD. Working Party on National Environmental Policy, Case Studies on Policy Instruments for Environmentally Sustainable Buildings. **Organisation for Economic Co-Operation and Development France**, 2002.

OECD. Environmentally Sustainable Buildings. Challenges and Policies. **Organisation for Economic Co-operation and Development**, 2003.

OECD/IEA. Transition to Sustainable Buildings - Strategies and opportunities to 2050. **International Energy Agency**, p. 290, 2013.

OECD/IEA. Tracking Clean Energy Progress 2017. **International Energy Agency**, p. 1–82, 2017.

OLIVEIRA, A.; VELOSO, C. Análise comparativa do desempenho dos programas Domus e EnergyPlus. **a Escola de Arquitetura. Universidade Federal de Minas Gerais**, 2012.

ONSET. HOBO ® U30 Station Remote Communication User ' s Guide. .

PALME, M. La sensibilidad energética de los edificios. **Universidad Politécnica de Cataluña. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona**, p. 294, 2010.

PARADISE, R. Energy Analysis Tools. **National Institute of Building Sciences**, 2010.

PEDRINI, A. Desenvolvimento de Metodologia de Calibração de Modelos para Simulações Térmica e Energética de Edificações. **PPGEC. Universidade Federal de Santa Catarina**, 1997.

PEDRO, H. T. C.; COIMBRA, C. F. M. Assessment of forecasting techniques for solar power production with no exogenous inputs. **Solar Energy**, v. 86, n. 7, p. 2017–2028, 2012.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Koppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, n. 5, p. 1633–1644, 2007.

PEIXOTO, L. K. O. .; BITTENCOURT, L. S. Estudo da ventilação natural na UFAL através

de simulação computacional. **Encontro Nacional sobre Conforto no Ambiente Construído**, v. 7, p. 1041–1048, 2003.

PEREZ, R.; PIERRE, I.; SEALS, R.; MICHALSKY, J.; STEWART, R. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. **Solar Energy**, v. 44, n. 5, p. 271–289, 1990.

PÉREZ LOMBARD, L.; ORTIZ, J.; POUT, C. A review on buildings energy consumption information. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 3, p. 394–398, 2008.

PINTO FILHO, G. F. Ferramenta computacional para dimensionamento e avaliação de desempenho de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. **PPGEE. Instituto de Tecnologia. UFPA.**, 2012.

PONTES, S. S. N. Concepção e Projeto de um Sistema Fotovoltaico Autônomo do Tipo SIGFI 45. **Faculdade de Engenharias Elétrica e Biomédica. Universidade Federal do Pará**, 2014.

RAMOS, G. Análise da iluminação natural calculada por meio do programa Energyplus. **Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. UFSC**, p. 121, 2008.

REINHART., C. DAYSIM. Disponível em: <<http://daysim.ning.com/>>. Acesso em: 3/10/2015.

REINHART, C. F.; WALKENHORST, O. Validation of dynamic RADIANCEbased daylight simulations for a test office with external blinds. **Energy and Buildings**, v. 33, n. 7, p. 683–697, 2001.

REPLAEX. Policarbonato. REFLETIVE MULTILUX. Disponível em: <<http://www.replaex.com.br>>. Acesso em: 13/6/2017.

RODRIGUES, M. D. J. D. S. Avaliação teórica e experimental de geradores fotovoltaicos sob diferentes condições de sombreamento. **PPGEE. Instituto de Tecnologia. UFPA.**, 2017.

RORIZ, M. Arquivos Climáticos de Municípios Brasileiros. 2015. Disponível em: <[http://www.roriz.eng.br/epw\\_9.html](http://www.roriz.eng.br/epw_9.html)>. .

RUIZ, G. R.; BANDERA, C. F. Validation of calibrated energy models: Common errors. **Energies**, v. 10, n. 10, 2017.

RÜTHER, R. Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil. **UFSC-LABSOLAR**, p. 114, 2004.

SAMPAIO, T. G. Estudo de Tipologias Habitacionais Amazônicas com Análise Ambiental para Fins Projetuais. **Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. UFPA**, 2013.

SANTOS, P. A. C. DOS. NZEB: Nearly Zero Energy Building. Metodologias para implementação NZEB. Aplicação a edifício unifamiliar novo., 2016.

SARQUIS, G. B. Arquitetura moderna e contemporânea em Belém : diálogo entre tempos.v. 62012849, n. 2002, 2011.

SCHERBA, A.; SAILOR, D. J.; ROSENSTIEL, T. N.; WAMSER, C. C. Modeling impacts of roof reflectivity, integrated photovoltaic panels and green roof systems on sensible heat flux into the urban environment. **Building and Environment**, v. 46, n. 12, p. 2542–2551, 2011.

SHAN, F.; TANG, F.; CAO, L.; FANG, G. Comparative simulation analyses on dynamic performances of photovoltaic-thermal solar collectors with different configurations. **Energy Conversion and Management**, v. 87, p. 778–786, 2014.

SILVA, P. C. P. DA. Análise do Comportamento Térmico de Construções não Convencionais através de Simulação em VisualDOE. **Escola de Engenharia. Universidade do Minho** Universidade do Minho, 2006.

SINAPI. Preços e Custos de Referência. Disponível em: <<http://www.caixa.gov.br/poder-publico/apoio-poder-publico/sinapi>>. Acesso em: 10/1/2018.

SOLARNOVA. BIPV Applications. Disponível em: <[http://www.solarnova.de/en/en\\_bipv.html](http://www.solarnova.de/en/en_bipv.html)>. Acesso em: 14/5/2017.

SOUZA, M. H. C. DE. Arquitetura ribeirinha em Belém do Pará: estudo de conforto ambiental. **Universidade de São Paulo, São Carlos**, 2002.

SZOKOLAY, S. V. Introduction to ARCHITECTURAL SCIENCE the basis of sustainable design. **Elsevier, Architectural Press**, 2004.

TELES, M. B. Avaliação operacional das diferentes arquiteturas de interligação de geradores fotovoltaicos à rede elétrica. **PPGEE. Instituto de Tecnologia. UFPA.**, 2017.

TOLEDO, G. E.; CÁRDENAS, O. F. Analysis of visual and non-visual effects of daylighting: benefits and strategies. **Cadernos de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. Universidade Mackenzie**, p. 113–129, 2015.

TORCELLINI, P.; PLESS, S.; DERU, M. Zero Energy Buildings : A Critical Look at the Definition Preprint. **NREL. National Renewable Energy Laboratory**, 2006.

TZOULIS, A. Performance assessment of building energy modelling programs and control optimization of thermally activated building systems. **Delft University of Technology (CiTG)**, 2014.

UE. Directiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho. Relativa ao desempenho energético dos edifícios. **Jornal Oficial da União Europeia**, p. 13–35, 2010.

US- DOE. Weather Data. 2015. Disponível em: <<https://energyplus.net/weather>>. .

US-DOE. Photovoltaics Can Add Capacity to the Utility Grid: Mapping the Effective Load-carrying Capacity of PV to Highlight Service Territories that Can Benefit from Photovoltaics. **National Renewable Energy Lab., Golden, CO**, 1996.

WALTZ, J. P. Computerized Building Energy Simulation Handbook. **The Fairmont Press**, 2000.

WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R. Building Simulation Calibration Using Sensitivity Analysis. **9Th International IBPSA Conference**, p. 1331–1338, 2005.

YANG, T.; ATHIENITIS, A. K. A study of design options for a building integrated photovoltaic/thermal (BIPV/T) system with glazed air collector and multiple inlets. **Solar Energy**, v. 104, p. 82–92, 2014.

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

# APÊNDICE

## Características das Capitais dos Estados da Amazônia Legal Brasileira

As características resumidas das outras capitais são especificadas a seguir.

- **Rio Branco (AC)** - A cidade de Rio Branco está localizada no estado do Acre, com coordenadas 9°58' de latitude sul e 67°48' de longitude oeste, elevação de 220 m, e apresenta uma temperatura máxima média mensal de 31,7 °C no mês de setembro, com mostra a Tabela A.1. Os dados de irradiação diária total são apresentados na

Figura A.1, onde se percebe que a maior irradiação diária é registrada no mês de outubro.

Tabela A.1. Médias horárias de temperaturas mensais de Rio Branco-AC. Fonte Arquivo EPW.

mês/hora	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
jan	23,03	22,92	22,85	22,75	22,58	22,47	22,64	23,56	24,85	26,21	27,00	27,82	28,25	28,38	28,44	28,09	27,76	27,15	25,31	24,61	24,09	23,81	23,51	23,30
fev	22,91	22,79	22,63	22,53	22,46	22,44	22,53	23,29	24,51	25,60	26,54	27,11	27,69	27,64	27,23	27,24	26,46	26,00	24,82	24,10	23,77	23,44	23,20	23,04
mar	23,17	22,98	22,81	22,67	22,57	22,44	22,47	23,43	24,64	26,04	27,41	27,92	27,97	28,15	28,49	27,95	27,21	26,27	24,88	24,30	24,00	23,76	23,48	23,36
abr	23,05	22,97	22,85	22,75	22,62	22,54	22,62	23,37	24,51	25,82	26,78	27,37	27,62	28,06	27,84	27,33	26,33	25,54	24,39	23,95	23,70	23,45	23,27	23,15
mai	22,81	22,68	22,43	22,30	22,16	22,06	22,05	23,30	24,83	26,28	27,30	27,88	28,57	29,04	28,32	28,04	27,43	26,13	24,89	24,45	24,03	23,75	23,35	23,08
jun	21,09	20,78	20,46	20,15	20,00	19,83	19,72	20,67	22,22	23,79	24,99	25,87	26,42	27,10	27,06	26,72	25,78	24,45	23,38	22,95	22,50	22,02	21,66	21,44
jul	21,54	21,19	20,95	20,58	20,42	20,11	19,79	21,18	23,41	25,34	26,66	27,70	28,50	28,80	28,96	29,11	28,49	26,68	25,02	24,30	23,48	23,14	22,50	21,93
ago	23,05	22,71	22,33	21,78	21,51	21,13	21,07	22,38	24,77	27,42	29,14	30,45	31,13	31,54	31,57	31,40	30,45	28,77	27,15	26,27	25,53	24,84	24,25	23,50
set	23,61	23,15	22,75	22,32	21,96	21,67	21,80	23,61	25,69	27,74	29,38	30,37	30,76	31,35	31,73	31,49	30,70	29,12	27,41	26,54	25,90	24,94	24,45	24,07
out	23,73	23,42	23,05	22,90	22,69	22,54	23,14	25,02	26,95	28,85	29,97	30,79	31,59	31,61	31,37	31,02	30,17	28,67	27,37	26,63	25,75	25,26	24,82	24,37
nov	23,87	23,61	23,43	23,23	23,09	22,95	23,54	24,88	26,36	27,55	28,71	29,45	29,84	29,84	30,01	29,80	29,20	27,84	26,41	25,71	25,19	24,74	24,46	24,20
dez	23,31	23,24	23,17	23,05	22,97	22,88	23,13	23,72	24,62	25,94	26,91	27,49	27,93	27,75	27,32	27,00	26,36	25,85	24,86	24,38	23,95	23,70	23,47	23,28

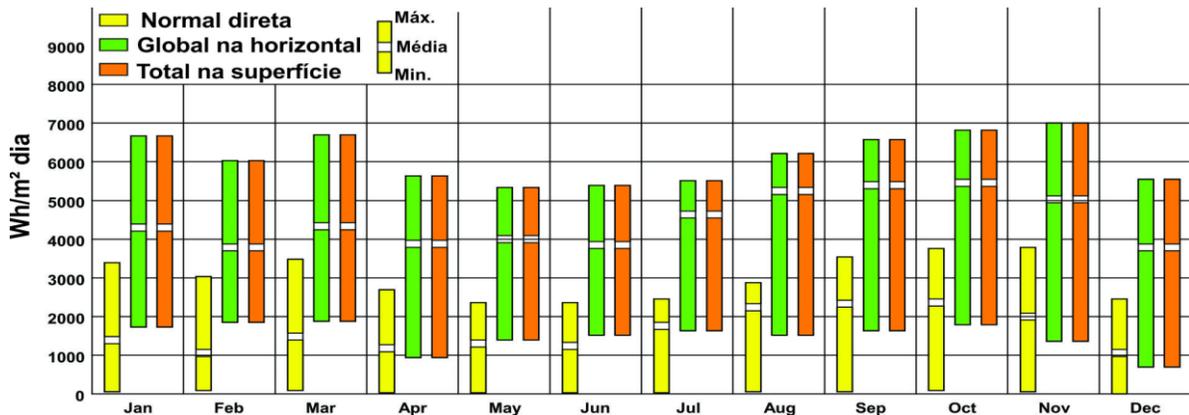


Figura A.1. Irradiação diária total de Rio Branco-AC. Fonte: CLIMATE 6.0.

• **Manaus (AM).** A cidade de Manaus está localizada no estado do Amazonas, nas coordenadas 03°06' de latitude sul, 60°01' de longitude oeste e 92 m de altitude média. Conforme classificação de Köppen-Geiger, seu clima pode ser categorizado pela sigla Am, apresentando características de clima tropical quente e úmido de monções, com alto índice pluviométrico e umidade relativa. Na Tabela A.2 verifica-se que a temperatura média máxima mensal ultrapassa os 32 °C e a média mínima apresenta-se em torno dos 24 °C. Os valores de irradiação são apresentados na Figura A.2, com maiores valores nos meses de outubro e novembro.

Tabela A.2. Médias horária de temperaturas mensais de Manaus-AM. Fonte: Arquivo EPW.

Mês/hora	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
jan	25,36	25,25	25,15	25,05	24,96	24,88	25,40	26,49	27,43	28,23	28,86	28,98	28,99	29,16	28,89	28,32	27,88	27,22	26,45	26,19	26,00	25,75	25,66	25,55
fev	25,54	25,46	25,28	25,34	25,29	25,26	25,66	26,46	27,26	27,82	28,53	28,93	29,01	29,39	29,40	28,25	28,10	27,02	26,44	26,01	25,87	25,86	25,78	25,73
mar	25,87	25,54	25,27	25,26	25,22	25,26	26,08	27,15	28,02	28,68	29,24	29,78	30,27	30,43	30,28	29,84	29,50	28,50	27,70	27,29	27,06	26,84	26,49	26,12
abr	24,91	24,92	24,75	24,57	24,49	24,72	25,41	26,14	26,83	27,61	28,11	28,33	28,90	28,69	28,62	28,37	28,14	27,10	26,11	25,88	25,70	25,51	25,36	25,04
mai	25,52	25,45	25,19	25,01	24,96	24,88	25,77	26,81	27,59	28,16	28,81	29,26	29,68	29,63	29,44	29,18	28,60	27,42	26,76	26,50	26,21	26,03	25,63	25,62
jun	24,73	24,61	24,44	24,51	24,30	24,19	25,25	26,99	27,78	28,51	29,03	29,58	29,53	29,63	29,67	29,59	28,93	27,45	26,47	25,93	25,85	25,69	25,28	25,08
jul	24,98	24,77	24,55	24,40	24,24	24,21	24,73	26,30	27,45	28,08	28,69	29,41	29,82	29,89	29,66	29,67	29,17	27,47	26,48	25,99	25,59	25,65	25,33	25,09
ago	25,65	25,38	25,09	24,85	24,57	24,55	25,68	27,59	28,76	29,44	30,24	31,12	31,65	31,88	32,06	31,63	31,03	29,14	27,42	27,02	26,71	26,44	26,34	26,14
set	26,64	26,36	25,87	25,52	25,22	25,28	26,82	28,42	29,78	30,64	31,58	32,20	32,88	33,18	33,11	32,57	31,75	30,06	28,85	28,43	28,08	27,69	27,37	26,90
out	25,80	25,80	25,39	25,17	24,89	24,66	26,13	27,77	29,11	30,10	31,07	31,89	32,48	32,53	31,95	31,35	30,22	29,09	28,16	27,64	27,25	26,93	26,55	26,00
nov	25,33	25,19	25,09	24,95	24,81	24,87	25,96	27,09	28,13	29,00	29,66	30,28	30,27	30,65	30,62	30,10	29,23	27,72	26,88	26,63	26,22	25,89	25,73	25,54
dez	25,13	24,91	24,74	24,62	24,50	24,43	25,35	26,40	27,78	28,86	29,37	29,90	29,75	29,70	29,32	28,35	27,54	26,85	26,35	25,96	25,76	25,63	25,42	25,28

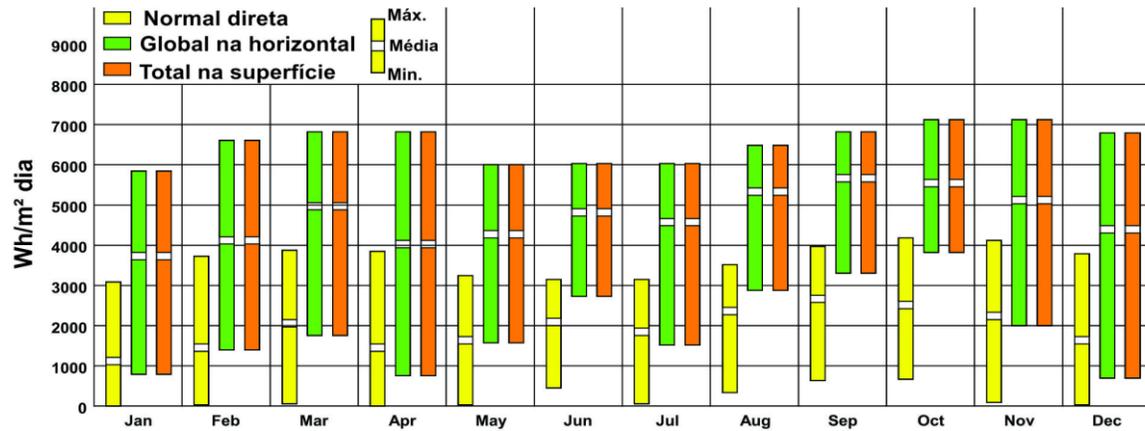


Figura A.2. Radiação diária total da cidade de Manaus-AM. Fonte: CLIMATE 6.0.

• **Macapá (AP).** A cidade de Macapá está localizada no estado do Amapá, na linha do Equador, a 0°02' de latitude norte e 51°03' de longitude oeste e elevação média de 15 m. Apresenta as temperaturas média mensal mais altas no mês de novembro, como mostra a Tabela A.3, onde a temperatura máxima ultrapassa os 33,7 °C. Figura A.3 apresenta os dados de irradiação diária total para esta cidade.

Tabela A.3. Médias horária de temperaturas mensais de Macapá-AP. Fonte: Arquivo EPW.

Mês/hora	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
jan	23,25	23,14	23,10	23,01	22,92	22,84	22,97	23,92	25,41	26,66	27,67	28,70	28,72	29,06	27,79	27,05	26,59	25,72	24,84	24,33	24,05	23,84	23,65	23,35
fev	23,17	23,07	22,95	22,95	22,85	22,78	22,83	23,61	24,70	25,86	26,65	27,35	27,69	27,65	26,60	26,46	25,92	25,08	24,36	24,09	23,96	23,76	23,57	23,40
mar	23,34	23,16	23,08	23,02	22,93	22,84	22,97	24,10	25,65	26,91	27,84	28,53	28,32	28,20	27,59	27,46	27,13	25,96	24,94	24,44	24,16	23,96	23,74	23,50
abr	23,37	23,26	23,13	23,01	22,87	22,82	23,13	24,33	26,13	27,54	28,70	29,66	29,89	29,20	28,69	28,19	27,08	26,34	25,27	24,78	24,49	24,19	23,90	23,65
mai	23,38	23,26	23,10	22,98	22,90	22,84	23,15	24,14	25,77	26,94	27,85	28,60	28,81	28,61	28,27	27,55	26,62	25,73	24,79	24,38	24,15	23,99	23,77	23,53
jun	23,05	22,88	22,77	22,64	22,55	22,52	22,75	24,00	25,83	27,22	28,13	28,50	28,26	28,07	27,88	27,60	26,52	25,77	24,68	24,23	23,95	23,66	23,37	23,21
jul	22,46	22,25	22,15	21,98	21,80	21,69	22,10	23,99	26,26	27,76	28,78	29,42	29,70	29,16	28,26	28,28	28,00	26,57	24,83	24,09	23,55	23,16	22,90	22,68
ago	22,99	22,74	22,59	22,46	22,27	22,14	22,52	24,74	27,09	28,45	29,57	31,00	31,21	31,22	30,69	30,13	29,23	27,93	25,84	24,94	24,32	23,99	23,65	23,29
set	23,36	23,02	22,77	22,43	22,13	22,06	22,84	25,31	27,90	29,64	30,83	31,92	32,46	32,81	32,32	31,50	30,52	29,05	27,18	26,19	25,41	24,79	24,36	23,84
out	23,48	22,87	22,64	22,42	22,22	22,01	23,31	26,10	28,55	30,36	31,56	32,67	33,33	33,11	33,01	32,07	30,61	29,00	27,60	26,71	25,87	25,24	24,68	24,05
nov	23,92	23,54	23,08	22,85	22,59	22,46	23,62	26,30	28,64	30,47	31,73	32,60	33,14	33,66	33,39	32,67	31,46	29,93	28,33	27,20	26,27	25,57	25,00	24,50
dez	23,52	23,43	23,37	23,30	23,26	23,21	23,60	24,90	26,56	28,10	29,21	30,20	30,43	29,96	29,05	28,19	26,90	26,01	25,06	24,62	24,26	24,04	23,82	23,60



Figura A.3. Radiação diária total da cidade de Macapá-AP. Fonte: CLIMATE 6.0.

• Cuiabá (MT). A cidade de Cuiabá, localiza-se no estado de Mato Grosso, com coordenadas 15°62’ sul de latitude e 56°00’ de longitude oeste e altitude de 151 m.. Entre as cidades analisadas apresenta as maiores diferenças entre temperaturas médias mensais máximas e mínimas no ano, como mostra a Tabela A.4, onde se registra uma temperatura média mínima de 18,3 °C no mês de junho e de 33,4 °C no mês de outubro. A Figura A.4 apresenta a irradiação solar diária recebida.

Tabela A.4. Médias horária de temperaturas mensais de Cuiabá-MT. Fonte: Arquivo EPW.

Mês/hora	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
jan	24,18	23,96	23,64	23,65	23,32	23,75	25,36	27,17	29,01	30,20	31,21	31,36	31,84	31,55	31,55	30,82	30,29	29,03	27,86	26,72	25,87	25,50	25,11	24,52
fev	24,10	23,92	23,91	24,06	24,18	24,64	25,83	27,30	28,13	29,61	30,79	30,70	30,74	31,03	30,42	30,29	29,29	27,94	26,60	25,92	25,48	25,20	24,74	24,34
mar	23,45	23,22	23,11	22,95	22,78	22,75	23,81	25,53	27,18	28,68	29,95	30,81	30,79	30,53	29,74	29,20	28,06	26,47	25,69	25,31	24,87	24,48	23,96	23,53
abr	22,73	22,17	21,90	21,69	21,35	21,09	21,64	22,85	24,00	25,02	25,83	26,31	27,01	28,00	28,42	28,50	27,94	27,18	26,96	26,36	25,92	25,15	24,08	23,46
mai	22,36	22,19	22,02	21,92	21,65	21,57	22,65	24,95	27,23	28,68	29,68	30,64	31,13	31,12	30,71	29,99	28,35	26,43	25,36	24,59	24,19	23,55	23,13	22,63
jun	19,48	19,25	19,02	18,63	18,44	18,30	19,01	21,01	23,30	25,05	26,51	27,38	28,04	28,42	28,44	28,06	26,68	24,28	23,01	22,41	21,75	21,23	20,59	19,95
jul	20,17	20,00	19,72	19,37	19,24	19,03	19,77	22,05	24,54	26,77	28,42	29,56	29,98	30,51	30,37	30,15	28,63	26,02	24,31	23,72	22,79	21,97	21,26	20,53
ago	21,91	21,50	21,02	20,50	20,03	19,76	20,97	23,61	26,42	28,97	30,80	32,01	32,83	33,06	33,14	32,30	30,91	28,37	26,64	25,60	24,62	23,62	22,91	22,50
set	23,94	23,68	23,30	22,92	22,73	22,58	24,20	26,13	27,98	29,50	30,56	31,50	32,26	32,43	32,57	31,87	30,82	29,21	27,75	26,92	26,12	25,48	24,77	24,29
out	25,68	25,35	25,08	24,83	24,34	24,88	26,17	27,97	29,38	30,59	31,73	32,64	33,38	33,42	33,25	32,08	30,98	29,65	28,64	27,97	27,47	26,93	26,49	26,05
nov	25,95	25,60	25,19	25,02	24,97	25,57	26,94	28,12	29,36	30,43	31,23	32,15	32,46	32,75	32,18	31,18	30,32	28,83	28,12	27,58	27,20	26,75	26,48	26,07
dez	24,61	24,53	24,47	24,34	24,22	24,57	25,88	27,24	28,25	29,33	30,12	30,35	30,27	30,51	30,31	29,97	29,12	27,83	26,61	26,05	25,72	25,23	25,00	24,82



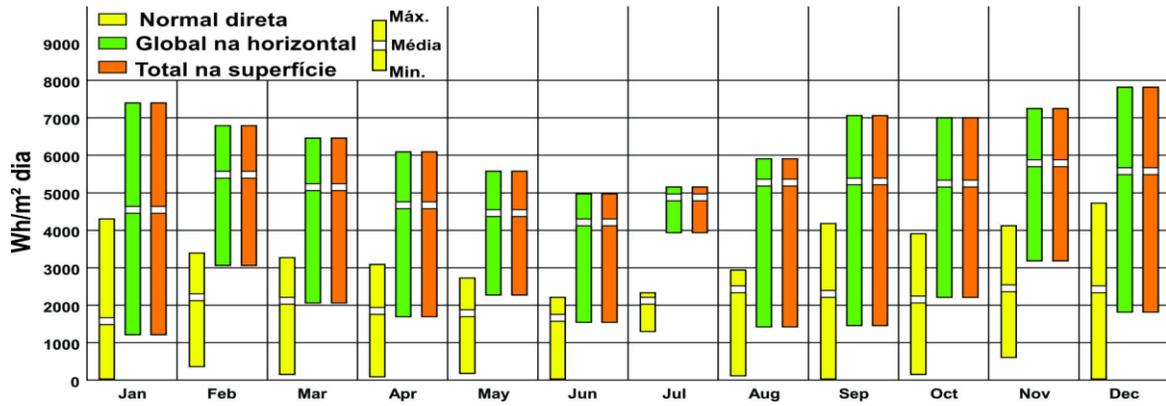


Figura A.4. Radiação diária total da cidade de Cuiabá-MT. Fonte: CLIMATE 6.0.

• **São Luís (MA).** São Luís está localizada no estado do Maranhão, com coordenadas 02°31' de latitude sul e 44°18' de longitude oeste, na região mais litorânea da Amazônia Legal, com uma altitude média de 56 m. Apresenta temperatura média mensal máxima de 31,2 °C no mês de outubro como mostra a Tabela A.5. A Figura A.5 mostra os níveis de irradiação recebidos diariamente.

Tabela A.5. Médias horária de temperaturas mensais de São Luis-MA. Fonte: Arquivo EPW.

Mês/hora	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
jan	25,04	24,82	24,72	24,60	24,50	24,47	25,23	26,28	27,45	28,05	28,29	28,63	28,77	28,86	28,54	28,15	27,39	26,50	25,97	25,63	25,47	25,38	25,25	25,09
fev	24,29	24,16	24,04	23,87	23,75	23,69	24,49	25,94	27,05	27,59	28,01	28,19	28,25	27,98	27,53	26,82	26,45	25,80	25,24	25,19	24,93	24,84	24,68	24,50
mar	24,68	24,42	24,39	24,32	24,15	24,05	25,18	26,89	27,61	28,57	28,94	29,07	29,25	28,63	28,06	27,27	26,78	26,11	25,60	25,43	25,17	25,02	24,96	24,84
abr	24,60	24,46	24,34	24,17	24,05	24,02	25,44	26,86	27,81	28,59	28,88	29,08	28,68	28,38	28,04	27,71	26,77	25,90	25,40	25,07	25,01	24,79	24,66	24,65
mai	25,38	25,35	25,27	25,22	25,18	25,24	26,56	27,78	28,65	29,62	30,11	30,20	29,76	29,29	28,79	28,31	27,77	26,71	26,21	25,92	25,75	25,60	25,48	25,45
jun	24,68	24,67	24,64	24,63	24,58	24,59	25,56	26,93	27,67	28,46	29,30	29,58	29,75	29,54	29,39	28,72	28,04	27,02	26,19	25,69	25,38	25,05	24,94	24,83
jul	24,97	24,85	24,69	24,60	24,60	24,63	25,50	26,99	27,49	28,23	28,97	29,21	29,51	29,51	29,35	28,87	28,19	26,89	26,10	25,58	25,27	25,07	24,95	24,87
ago	24,46	24,28	24,20	24,14	24,07	24,05	25,53	26,94	27,97	28,89	29,53	30,14	30,39	30,32	29,98	29,23	28,25	26,99	26,11	25,64	25,24	24,95	24,77	24,65
set	24,89	24,80	24,82	24,88	24,98	25,08	26,11	27,30	28,21	29,06	30,02	30,74	30,95	30,77	30,10	29,15	27,94	26,67	26,02	25,72	25,46	25,25	25,17	25,06
out	25,44	25,31	25,26	25,24	25,22	25,39	26,65	27,72	28,66	29,65	30,32	31,03	31,25	31,02	30,25	29,18	27,88	26,73	26,25	26,04	25,93	25,85	25,77	25,60
nov	25,48	25,37	25,33	25,31	25,33	25,50	26,55	27,87	28,89	29,70	30,40	31,00	31,09	30,81	30,30	29,34	28,07	26,87	26,39	26,12	25,95	25,82	25,71	25,64
dez	25,73	25,62	25,48	25,35	25,25	25,24	26,38	27,75	28,88	29,65	30,32	30,69	30,99	30,77	30,49	29,72	28,49	27,34	26,78	26,53	26,33	26,20	26,02	25,83

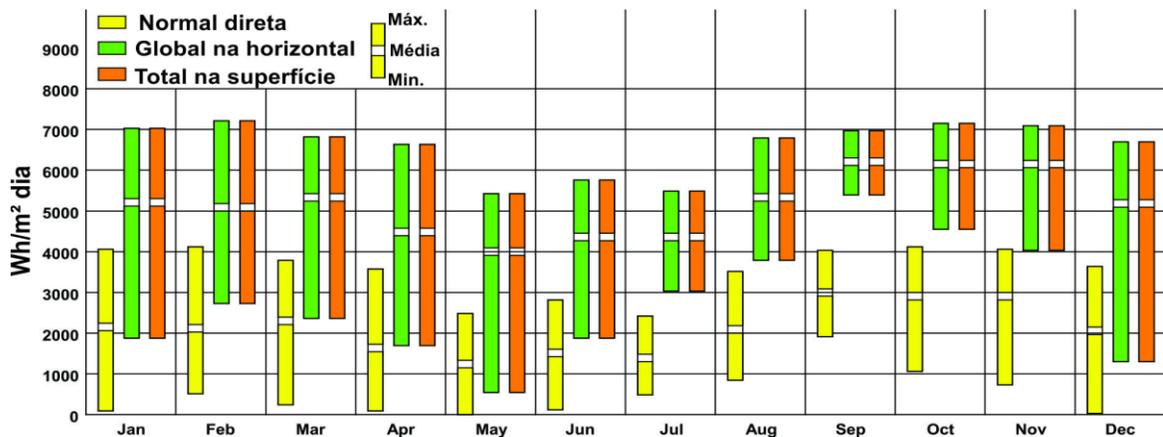


Figura A.5. Radiação diária total da cidade de São Luis-MA. Fonte: CLIMATE 6.0.

• Porto Velho (RO). A cidade de Porto Velho, localizada no estado de Roraima com coordenadas 08°45' de latitude sul e 63°54' de longitude oeste, e altitude de 83 m. é uma das capitais com temperaturas mais baixas na Região como mostra a Tabela A.6. Os níveis de irradiação diária recebida está nos meses de outubro e novembro como mostra a Figura A.6.

Tabela A.6. Médias horária de temperaturas mensais de Porto Velho-RO. Fonte: Arquivo EPW.

Mês/hora	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
jan	23,82	23,82	23,63	23,60	23,51	23,47	23,83	24,77	25,93	26,95	28,05	28,15	28,80	28,35	28,48	28,32	27,78	27,16	25,92	25,32	24,83	24,42	24,11	23,98
fev	23,59	23,60	23,53	23,49	23,39	23,38	23,64	24,43	25,50	26,23	26,83	27,67	27,73	28,00	28,47	28,42	27,80	26,51	25,12	24,46	24,30	24,10	23,83	23,64
mar	23,64	23,50	23,43	23,33	23,24	23,15	23,60	24,73	26,05	27,05	28,02	28,56	29,00	29,15	28,86	28,43	28,01	26,45	25,51	24,84	24,37	24,15	23,91	23,80
abr	23,75	23,59	23,47	23,35	23,35	23,31	23,65	24,64	25,99	27,24	28,22	28,97	29,01	29,34	29,06	28,84	27,69	26,40	25,25	24,72	24,41	24,13	24,06	23,90
mai	23,35	23,10	22,88	22,77	22,68	22,58	22,96	24,37	26,06	27,56	28,52	29,12	29,59	29,45	29,65	28,98	27,79	26,50	25,27	24,69	24,53	24,16	23,72	23,52
jun	22,74	22,52	22,34	22,14	21,95	21,90	22,25	23,92	25,41	26,88	27,87	28,44	28,97	29,09	28,89	28,72	27,78	26,11	24,73	24,00	23,61	23,39	23,03	22,79
jul	22,36	22,11	21,90	21,74	21,58	21,55	23,47	26,33	28,40	30,30	31,64	32,07	32,61	32,63	32,18	31,58	30,07	27,73	25,81	24,69	24,14	23,55	23,18	22,64
ago	22,36	22,11	21,90	21,74	21,58	21,55	23,47	26,33	28,40	30,30	31,64	32,07	32,61	32,63	32,18	31,58	30,07	27,73	25,81	24,69	24,14	23,55	23,18	22,64
set	23,34	23,15	22,90	22,66	22,34	22,38	24,02	26,47	28,52	30,35	31,51	32,27	32,51	32,62	31,22	30,69	29,59	28,15	26,50	25,53	24,81	24,40	23,89	23,69
out	24,04	23,82	23,70	23,46	23,32	23,20	24,56	26,44	28,24	29,72	30,91	31,62	32,16	32,26	31,54	31,20	30,24	28,77	27,16	26,29	25,55	25,11	24,84	24,48
nov	24,59	24,38	24,25	24,09	23,93	23,89	24,44	25,30	26,38	27,58	28,97	29,92	30,56	30,53	30,50	29,38	28,54	27,60	26,70	26,05	25,61	25,29	25,10	24,82
dez	24,42	24,28	24,19	24,09	23,98	23,88	24,14	24,73	25,46	26,24	27,06	27,93	28,54	28,81	28,48	28,15	27,71	26,92	26,08	25,49	25,17	24,89	24,75	24,55

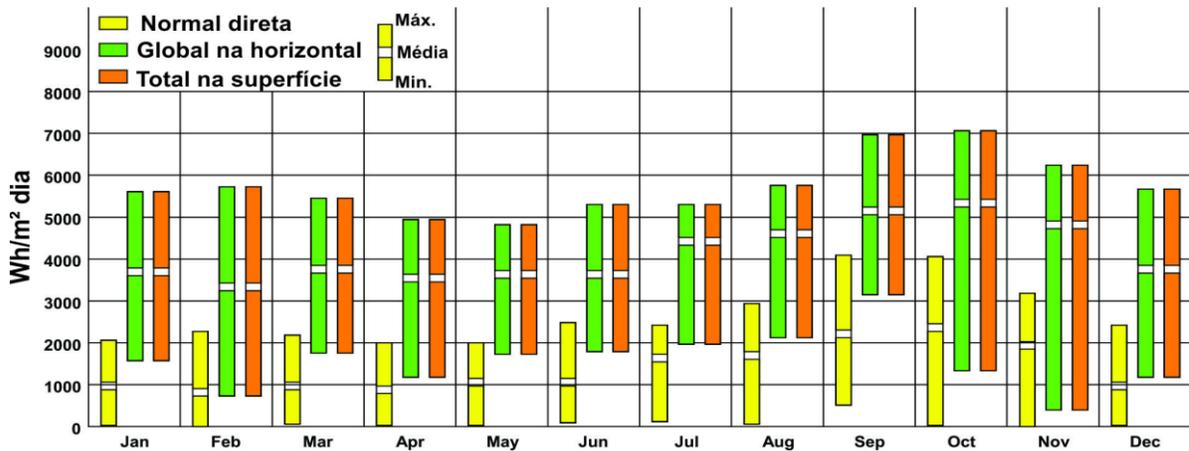


Figura A.6. Radiação diária total da cidade de Porto Velho-RO. Fonte: CLIMATE 6.0.

• Boa Vista (RR). Boa Vista localiza-se no estado de Roraima, com coordenadas 2°49' de latitude norte e 60°40' de longitude oeste, no extremo norte da Região Amazônica, com altitude de 76 m. Como mostra a Tabela A.7, na maior parte das horas do ano sua temperatura média mensal encontra-se acima de 30 °C, alcançando a maxima de 33,5 °C. A Figura A.7 mostra os níveis de irradiação recebidos.

Tabela A.7. Médias horária de temperaturas mensais de Boa Vista-RR. Fonte: Arquivo EPW.

Mês/hora	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
jan	24,82	24,64	24,43	24,21	24,02	23,86	24,19	25,66	27,30	28,97	29,76	30,84	31,01	31,44	31,17	31,11	30,58	29,07	27,91	27,14	26,43	25,80	25,41	25,06
fev	25,63	25,35	24,99	24,88	24,68	24,44	24,69	26,04	27,66	29,16	30,47	31,56	32,10	32,32	32,42	31,99	31,40	30,14	28,90	28,05	27,30	26,86	26,40	25,94
mar	24,16	23,92	23,75	23,61	23,55	23,34	23,65	24,80	26,18	27,36	28,49	29,52	29,79	29,75	29,56	28,85	28,42	27,19	26,18	25,68	25,35	25,06	24,73	24,28
abr	23,99	23,82	23,69	23,65	23,64	23,62	24,04	25,17	26,47	27,56	28,57	29,30	29,47	29,60	29,70	29,39	28,63	27,35	25,88	25,24	24,91	24,68	24,53	24,20
mai	23,87	23,59	23,38	23,32	23,17	23,09	23,72	25,14	26,35	27,43	28,30	28,94	29,42	29,56	29,49	28,97	28,21	27,12	25,75	25,13	24,75	24,55	24,30	24,07
jun	24,03	23,83	23,66	23,48	23,42	23,36	23,90	24,87	26,08	27,12	28,03	28,88	29,06	28,92	29,44	29,27	28,57	26,89	25,67	25,13	24,85	24,72	24,40	24,35
jul	24,04	23,75	23,77	23,61	23,35	23,23	24,23	25,31	26,44	27,74	28,96	29,05	29,55	29,80	29,55	29,70	29,30	27,42	25,79	25,20	25,17	24,75	24,47	24,16
ago	25,31	25,09	24,83	24,67	24,38	24,31	25,65	27,15	28,42	29,87	31,06	31,99	32,73	33,18	32,98	32,49	31,19	29,63	28,15	27,43	26,97	26,60	26,17	25,79
set	25,31	25,09	24,83	24,67	24,38	24,31	25,65	27,15	28,42	29,87	31,06	31,99	32,73	33,18	32,98	32,49	31,19	29,63	28,15	27,43	26,97	26,60	26,17	25,79
out	25,78	25,57	25,25	25,05	24,75	24,68	26,25	27,87	29,37	30,75	31,87	32,66	33,31	33,48	33,30	32,71	31,29	29,86	28,95	28,43	27,94	27,37	26,87	26,15
nov	25,03	24,76	24,52	24,39	24,24	24,03	25,10	26,61	28,12	29,39	30,65	31,46	31,86	31,51	31,32	30,98	29,66	28,11	26,98	26,60	26,30	25,88	25,52	25,35
dez	24,75	24,42	24,14	23,98	23,89	23,76	24,70	26,18	27,79	29,26	30,26	30,68	30,87	31,09	31,39	31,12	29,83	28,31	27,29	26,78	26,38	25,90	25,41	25,04

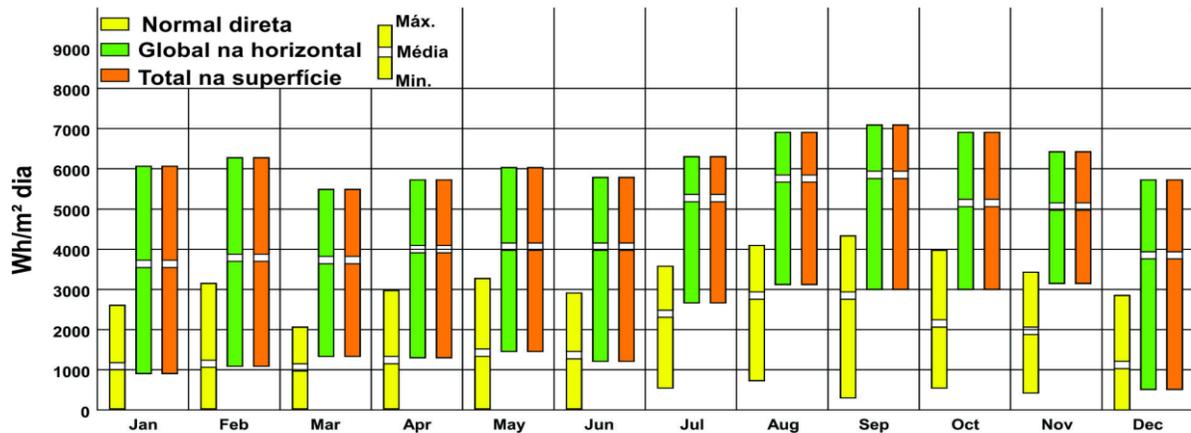


Figura A.7. Radiação diária total da cidade de Boa Vista-RR. Fonte: CLIMATE 6.0.

• **Palmas (TO).** A cidade de Palmas, capital do estado de Tocantins, localizada nas coordenadas 10°12' de latitude sul e 48°21' de longitude oeste, com uma elevação média de 280 m. Apresenta a maior média de temperatura das capitais da Região, com baixo índice de umidade. A Tabela A.8 mostra a temperatura horária ao longo do ano e a Figura A.8 mostra os índices de irradiação total recebida durante o dia.

Tabela A.8. Médias horária de temperaturas mensais de Palmas-TO. Fonte: Arquivo EPW.

Mês/hora	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
jan	24,44	24,00	23,70	23,43	23,30	23,08	23,70	25,53	27,16	28,54	29,25	29,90	30,52	30,38	30,12	29,98	29,00	27,93	26,43	25,72	25,30	24,87	24,79	24,65
fev	23,54	23,35	23,15	22,94	22,93	22,66	22,99	24,61	25,60	26,85	27,45	28,09	28,15	28,84	28,66	28,33	27,96	26,83	25,49	24,86	24,70	24,25	24,01	23,75
mar	23,95	23,76	23,57	23,35	23,18	22,95	23,39	25,08	26,49	27,64	28,65	29,20	29,22	29,58	29,43	29,54	28,46	27,31	26,15	25,52	25,03	24,73	24,53	24,33
abr	23,92	23,62	23,51	23,47	23,35	23,10	23,39	24,80	26,20	27,32	27,88	28,42	28,64	28,89	28,85	28,34	28,22	26,89	25,61	25,03	24,86	24,49	24,30	24,10
mai	24,63	24,27	23,95	23,74	23,35	23,44	23,99	25,78	27,26	28,50	29,45	30,20	30,73	31,11	30,99	30,63	29,95	28,01	26,15	25,45	25,00	24,81	24,83	24,55
jun	24,85	24,31	23,94	23,52	23,43	23,12	23,88	26,31	28,09	29,32	30,47	31,44	31,90	32,31	32,38	31,64	30,83	28,66	26,56	25,44	24,92	24,85	25,07	24,93
jul	23,23	22,65	21,90	21,34	21,42	21,10	21,73	25,27	28,13	30,46	31,98	33,06	33,73	33,95	33,89	33,42	32,45	30,19	27,34	26,01	25,05	24,68	23,86	23,85
ago	25,39	25,00	24,24	23,91	23,69	23,56	24,72	27,20	29,49	31,15	32,96	34,24	34,89	35,38	35,25	34,98	34,18	32,15	29,32	28,19	27,38	26,77	26,03	25,78
set	25,44	24,95	24,92	24,39	24,17	24,40	25,38	27,88	29,74	31,16	32,30	33,07	33,37	34,24	34,37	33,76	33,15	31,55	29,57	28,61	27,87	27,23	26,57	25,74
out	24,16	23,88	23,70	23,43	23,39	23,16	24,19	25,71	27,21	28,36	29,46	30,07	29,88	30,07	30,00	29,61	28,65	27,69	26,60	26,04	25,53	25,26	24,89	24,54
nov	24,06	23,81	23,57	23,47	23,18	23,20	24,25	26,30	27,79	29,33	29,85	30,39	30,64	30,98	30,72	30,16	29,07	28,00	26,81	26,25	25,65	25,01	24,56	24,28
dez	23,68	23,50	23,24	22,95	22,80	22,69	23,55	25,02	26,40	27,78	28,80	29,47	30,14	29,94	29,97	29,26	28,04	27,42	26,11	25,40	24,98	24,75	24,16	23,94



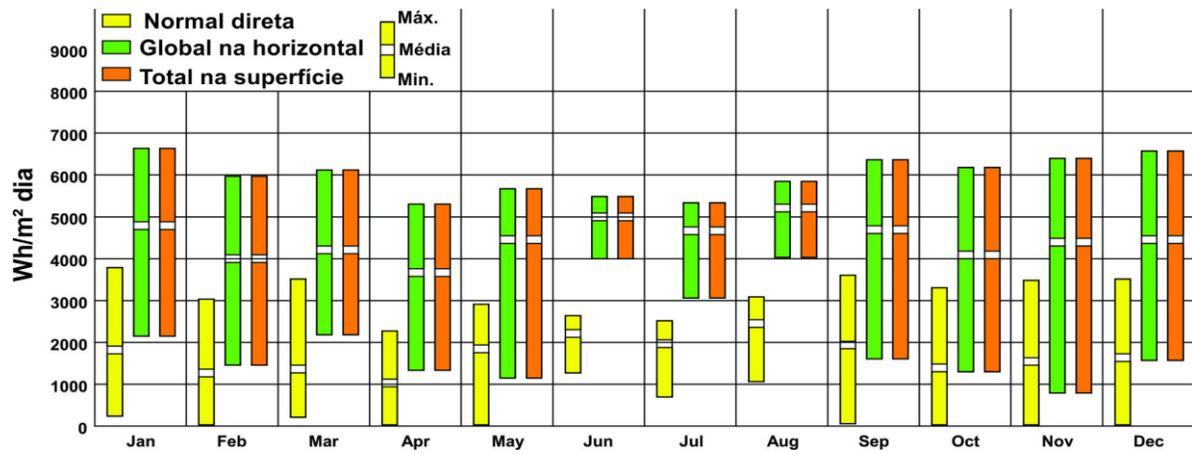


Figura A.8. Radiação diária total da cidade de Palmas-TO. Fonte: CLIMATE 6.0.