

MELANIE GISSEL URDANGARIN GAMARRA

**PROJETO DE CASA RURAL EM CONTÊINERES ENERGIA
ZERO POR MEIO DE OTIMIZAÇÃO NUMÉRICA PARA
DIFERENTES CLIMAS DO BRASIL**

CASCADEL
PARANÁ – BRASIL
MARÇO – 2020

MELANIE GISSEL URDANGARIN GAMARRA

**PROJETO DE CASA RURAL EM CONTÊINERES ENERGIA
ZERO POR MEIO DE OTIMIZAÇÃO NUMÉRICA PARA
DIFERENTES CLIMAS DO BRASIL**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Jair Antonio Cruz Siqueira

Coorientadores: Carlos Eduardo Camargo Nogueira

Luciene Kazue Tokura

CASCADEL
PARANÁ – BRASIL
MARÇO – 2020

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Gamarra, Melanie Gissel Urdangarin

Projeto de casa rural em contêineres energia zero por meio de otimização numérica para diferentes climas do Brasil / Melanie Gissel Urdangarin Gamarra; orientador(a), Jair Antonio Cruz Siqueira; coorientador(a), Carlos Eduardo Camargo Nogueira, coorientador(a)II, Luciene Kazue Tokura, 2020.
169 f.

Dissertação (mestrado), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Cascavel, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, 2020.

1. Edificação energia zero. 2. Casa contêiner. 3. Otimização baseada em simulação termo-energética. 4. Conforto térmico. I. Siqueira, Jair Antonio Cruz. II. Nogueira, Carlos Eduardo Camargo. III. Tokura, Luciene Kazue. IV. Título.

MELANIE GISSEL URDANGARIN GAMARRA

Projeto de casa rural em contêineres energia zero por meio de otimização numérica para diferentes climas do Brasil

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestra em Engenharia de Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, linha de pesquisa Fontes Renováveis e Racionalização de Energia Na Agroindústria e Agricultura, APROVADO(A) pela seguinte banca examinadora:



Orientador(a) - Jair Antonio Cruz Siqueira

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Hitomi Mukai

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Aurea Lucia Vendramin Georgi

Universidade Presbiteriana Mackenzie (MACKENZIE)

Cascavel, 10 de março de 2020

AGRADECIMENTOS

Agradeço o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES). Sem a bolsa de estudos concedida o presente trabalho não teria sido concebido.

Agradeço à Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE e aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura por ter me dado a oportunidade de me formar como Mestre.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Jair Siqueira, por aceitar me orientar e acreditar em mim ao longo do caminho. Aos coorientadores Prof. Dr. Carlos Eduardo C. Nogueira e Dra. Luciene Tokura, e aos membros da banca examinadora, Prof. Dra. Hitomi Mukai e Prof. Dra. Aurea Vendramin.

Agradeço aos meus pais e irmãs pelo incentivo e apoio incondicional. A todos os amigos que fiz durante minha estadia no Brasil e especialmente ao meu amigo Giovane Sylvestrin por estar presente em todo momento.

Agradeço a todas as pessoas que fizeram minha estadia em Cascavel mais amena e em particular ao Bernardo Olavo que tantas vezes animou meus dias. Também, ao meu coelhinho Bunny pela companhia e felicidade proporcionadas.

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANTAC	Âgencia Nacional de Transportes Aquaviários
AQS	Água quente sanitária
Berkeley Lab	<i>Lawrence Berkeley National Laboratory</i>
CIB	Conselho Internacional de Redes de Pesquisa em Construção
CMs	Contêineres marítimos
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
DS	Desenvolvimento Sustentável
EBCMs	Edificações Baseadas em Contêineres Marítimos
EPBD	<i>Energy Performance of Building Directive</i>
FDI	Fator de Dimensionamento do Inversor
FV	Fotovoltaica
GA	Algoritmo Genético (<i>Genetic Algorithm</i>)
GEE	Gases de efeito estufa
HC	<i>High Cube</i>
HSP	Horas de Sol Pleno
IEA	<i>International Energy Agency</i>
LCC	Custo do Ciclo de Vida (<i>Life-cycle Cost</i>)
LCOE	Custo nivelado da eletricidade (<i>Levelized Cost of Electricity</i>)
MB	Modelo Base
MF	Módulo Fotovoltaico
MO	Modelo Otimizado
MO _{ACH}	Modelo Otimizado retificado
MOC	Modelo Otimizado com Conforto
MOC _{SAS}	Modelo Otimizado com conforto retificado com o SAS
NZE	Energia Zero (<i>Net-zero Energy</i>)
NZEBs	Edificações Energia Zero (<i>Net-zero Energy Buildings</i>)
OBS	Otimização Baseada em Simulação
1PC	Uma Planta Compacta
1PL	Uma Planta em forma de L
2P	Dois Pisos
PF	Painel Fotovoltaico

PMV	Voto Médio Predito (<i>Predicted Mean Vote</i>)
PPD	Porcentagem de Pessoas Insatisfeitas (<i>Predicted Percentage of Dissatisfied</i>)
PSA	<i>Particle Swarm Algorithm</i>
SAS	Sistema de Aquecimento de Água Solar
SF	Sistema Fotovoltaico
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
SFI	Sistema Fotovoltaico Isolado
SPPM	Seguimento do Ponto de Máxima Potência
U	Transmitância térmica
UE	União Europeia
VPL	Valor Presente Líquido
VP	Valor Presente
ZB	Zona Bioclimática

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Pilares da construção sustentável desenvolvidos pelo CIB.	5
Figura 2: Vista axonométrica explodida de um contêiner típico ISSO 20'.	12
Figura 3: Estratégias de desenho passivas.....	19
Figura 4: Ângulos das proteções solares horizontais (esq.) e verticais (dir.).....	24
Figura 5: Zoneamento bioclimático brasileiro.	30
Figura 6: Exemplo de busca do algoritmo Hooke-Jeeves.	39
Figura 7: Laço de acoplamento aplicado na OBS de edificações.	40
Figura 8: Frequência do uso de ferramentas de otimização de edificações.....	41
Figura 9: Frequência do uso de ferramentas de simulação de edificações.....	41
Figura 10: Esquema das etapas da metodologia	44
Figura 11: Modelo de uma planta compacto (1PC).	46
Figura 12: Modelo de uma planta com forma de L (1PL).	47
Figura 13: Modelo de dois pisos (2P).	47
Figura 14: Mancha de temperaturas para Florianópolis 21 de dez. a 21 de jun.....	53
Figura 15: Variáveis geométricas da janela com brise horizontal.....	53
Figura 16: Planta baixa simplificada do MB.....	55
Figura 17: Cronograma de ocupação da cozinha, sala-comedor e dormitórios.	56
Figura 18: Controle de iluminação escalonado com 2 etapas.	59
Figura 19: Pontos de referência para controle da luz natural. Altura = 0,75 m.....	59
Figura 20: Cidades representativas de cada zona bioclimática.....	63
Figura 21: Temperaturas máximas, mínimas e médias das ZBs.....	63
Figura 22: Irradiação solar diária média mensal.....	64
Figura 23: Interface entre GenOpt e EnergyPlus.	65
Figura 24: Custo em películas solares considerando inflação.....	71
Figura 25: Carta solar de Florianópolis contendo a radiação global de 22 de dezembro a 21 de junho.....	75
Figura 26: Temperaturas médias mensais e limites dos <i>schedules</i> das aberturas. ..	80
Figura 27: <i>Schedule</i> anual das aberturas.....	80
Figura 28: Representação gráfica do modelo de isolamento de roupas proposto.....	86
Figura 29: Limites de aceitabilidade da temperatura operacional da ASHRAE 55....	87
Figura 30: Configuração de SAS modelado pelo SAM.....	92

Figura 31: Curva de carga do dia de desenho para Cuiabá. $P_{\text{máx}} = 1.900\text{W}$	106
Figura 32: Consumo anual do MB por classe e zona bioclimática.	112
Figura 33: Consumo mensal do MB por classe e zona bioclimática.	113
Figura 34: Consumo em iluminação e climatização antes e após.....	117
Figura 35: Diferença do custo do ciclo de vida (dLCC), investimento (dI)	118
Figura 36: Minimização do dLCC para a zona bioclimática 8.....	118
Figura 37: Consumo anual do MO_{ACH} por classe e zona bioclimática.....	121
Figura 38: Horas de desconforto anuais calculadas pelos modelos de.....	125
Figura 39: Consumo em condicionamento de ar do MOC em comparação	126
Figura 40: Composição dos custos dos SFIs	131
Figura 41: Energia a.c. entregue mensalmente pelos SFCRs.....	133
Figura 42: Consumo e produção de energia dos SFCRs	133
Figura 43: Comparação do VPL das alternativas com SFCR e SFI, para a tarifa residencial e rural.	136
Figura 44: Comparação dos indicadores de desempenho energético e temperatura média de países da UE com os modelos desenvolvidos.....	139

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação e dimensões nominais dos ISO CM.	12
Tabela 2: Levantamento bibliográfico dos estudos sobre EBCMs	13
Tabela 3: Classes de aceitabilidade da ASHRAE 55	28
Tabela 4: Transmitância térmica de paredes externas, U ($W/m^2.K$)	32
Tabela 5: Capacidade térmica de paredes externas, C_T ($kJ/m^2.K$).....	32
Tabela 6: Área mínima de ventilação (A) em porcentagem da área do piso	32
Tabela 7: Transmitância térmica da cobertura, U (W/m^2K)	33
Tabela 8: Critério de avaliação de desempenho térmico no verão.....	33
Tabela 9: Critério de avaliação de desempenho térmico no inverno	34
Tabela 10: Resumo dos parâmetros envolvidos na OBS.	37
Tabela 11: Fases dos estudos de OBS aplicada a edificações.....	38
Tabela 12: Quantidade de domicílios segundo o número de cômodos.....	45
Tabela 13: Composição das paredes externas e cobertura	49
Tabela 14: Adequação dos resultados de U e C_T com os requisitos da NBR 15.575	49
Tabela 15: Dados climáticos dos dias típicos para a cidade de Florianópolis.	50
Tabela 16: Composição dos fechamentos internos e externos	50
Tabela 17: Propriedades termo-físicas dos elementos construtivos	51
Tabela 18: Propriedades termo-ópticas dos vidros.	51
Tabela 19: Adequação dos modelos à norma NBR 15.575.....	52
Tabela 20: Dimensões dos brises horizontais calculados	54
Tabela 21: Propriedades óticas da cortina utilizada nas simulações.	54
Tabela 22: Carga térmica dos três modelos geométricos de edificação propostos...	55
Tabela 23: Variáveis de entrada para o método dos lúmens	57
Tabela 24: Determinação do tipo e quant. de lâmpadas/luminárias por ambiente. ...	58
Tabela 25: Estimativa do consumo dos eletrodomésticos.....	60
Tabela 26: Parâmetros do termostato com base na NBR 16401-2	61
Tabela 27: Resultados do dimensionamento	61
Tabela 28: Características dos condicionadores de ar comerciais selecionados.....	62
Tabela 29: Rentabilidade das principais aplicações financeiras.....	67
Tabela 30: Histórico das tarifas das classes de consumo residencial e rural.....	67
Tabela 31: Parâmetros econômicos para o cálculo da função objetivo LCC.....	68

Tabela 32: Características da película de controle solar e vidro simples.	75
Tabela 33: Variáveis independentes a serem otimizadas	77
Tabela 34: Algoritmos para otimização multidimensional disponíveis	78
Tabela 35: Variáveis da otimização necessárias no cálculo de % aberto	81
Tabela 36: Variáveis para o cálculo de %aberto constantes	81
Tabela 37: Velocidades predominantes do vento (Vw)	82
Tabela 38: Temperaturas médias interior e exterior	82
Tabela 39: Cálculo do %aberto para a zona bioclimática 8	84
Tabela 40: Consumo de água quente	88
Tabela 41: Volume de armazenamento.....	89
Tabela 42: Energia útil e perdas térmicas	90
Tabela 43: Fator de correção para a inclinação do coletor solar	90
Tabela 44: Especificações dos modelos de coletor solar selecionados	91
Tabela 45: Área coletora e número de coletores.....	91
Tabela 46: Simulação da produção do SAS para Curitiba	94
Tabela 47: Custos dos insumos do SAS	94
Tabela 48: Investimento nas diferentes configurações do SAS	94
Tabela 49: Exemplo de fluxo de caixa, configuração com 1 coletor RSC1000T	95
Tabela 50: Cálculo da potência do painel fotovoltaico	97
Tabela 51: Especificações do módulo fotovoltaico nas condições padrão	98
Tabela 52: Número de módulos fotovoltaicos	98
Tabela 53: Especificações da bateria selecionada.....	99
Tabela 54: Dimensionamento do banco de baterias	100
Tabela 55: Possíveis configurações de blocos de baterias	101
Tabela 56: Determinação do arranjo de blocos de baterias e módulos/bloco	101
Tabela 57: Arranjo de blocos de baterias e módulos/bloco final	102
Tabela 58: Especificações dos controladores de carga selecionados	102
Tabela 59: Tensões de máxima potência nas temperaturas extremas	103
Tabela 60: Cálculo do N° de módulos em série	104
Tabela 61: Dimensionamento do controlador de carga.....	105
Tabela 62: Especificações dos inversores selecionados.....	106
Tabela 63: Potência instalada	107
Tabela 64: Dimensionamento dos inversores	107

Tabela 65: Potência e número de módulos dos SFCRs.....	108
Tabela 66: Dimensionamento do inversor, P_{Nca} admissíveis de acordo com FDI ...	109
Tabela 67: Comprovação da tensão e corrente dos inversores	111
Tabela 68: Consumo de eletricidade anual do MB por zona bioclimática	112
Tabela 69: Resultado da aplicação de diferentes algoritmos de otimização	114
Tabela 70: Resultados da minimização da função dLCC por zona bioclimática	115
Tabela 71: Resultados da minimização da função <i>Cons</i> por zona bioclimática	116
Tabela 72: Diferença entre os valores das variáveis que minimizam o	117
Tabela 73: Resultado do cálculo de %abertura	119
Tabela 74: Retificação do consumo do modelo otimizado (MO) de acordo com a ventilação natural	120
Tabela 75: Consumo anual do modelo otimizado retificado por zona bioclimática	121
Tabela 76: Avaliação das horas de conforto pelo modelo de Fanger.....	122
Tabela 77: Avaliação das horas de conforto pelo método adaptativo	123
Tabela 78: Consumo anual do MOC em comparação aos outros modelos	126
Tabela 79: Resultado do dimensionamento do SAS	127
Tabela 80: Consumo em aquecimento de água e retificação do consumo em equipamentos elétricos.....	128
Tabela 81: Consumo do MOC considerando o SAS	129
Tabela 82: Resultados do dimensionamento dos SFIs	130
Tabela 83: Custos dos insumos do SFI.....	130
Tabela 84: Resultado do dimensionamento dos SFCRs	131
Tabela 85: Custos dos insumos do SFCR.....	132
Tabela 86: Energia a.c. entregue durante a vida útil dos SFCRs (kWh/ano)	132
Tabela 87: Análise financeira das propostas de eficiência - Tarifa residencial.....	135
Tabela 88: Análise financeira do total de propostas de eficiência - Tarifa rural.....	135
Tabela 89: Indicadores de desempenho energético expressos como energia primária (kWh/m ² . ano) definidos por países membros da EU	138
Tabela 90: Indicadores de desempenho calculados para os modelos de	139

URDANGARIN, Melanie G. G. Ma. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, março de 2020. **Projeto de casa rural em contêineres energia zero por meio de otimização numérica para diferentes climas do Brasil.** Orientador: Prof. Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira. Coorientadores: Carlos E. C. Nogueira, Luciene K. Tokura.

RESUMO

Uma das chaves para satisfazer o aumento da demanda por eletricidade é a construção de edifícios mais eficientes. Por este motivo, as edificações energia zero (NZEB) são o alvo da construção civil a nível mundial. Com o intuito de preencher a carência de estudos sobre NZEB de baixo custo em climas quentes, o presente trabalho tem por objetivo propor um projeto de habitação energia zero, em contêineres marítimos, para cada zona bioclimática brasileira. A metodologia para atingir esse objetivo compreende: a definição de um modelo base de simulação no programa EnergyPlus; a minimização das funções objetivo: consumo de energia e diferença no custo do ciclo de vida, por meio do programa GenOpt; uma análise do conforto térmico; e o cálculo de sistemas solares. Mediante a otimização, foram obtidas reduções do consumo em ar condicionado e iluminação entre 14 e 27%, e diminuição média das horas de desconforto entre 11 e 23%, pelos modelos de Fanger e adaptativo, respectivamente. Além disso, o consumo em ar condicionado quando a temperatura de conforto segue o modelo adaptativo, foi reduzido entre 30 e 37%. Através dos sistemas solares foi possível suprir a demanda energética dos modelos de edificação, cumprindo com o objetivo energia zero. Da análise econômica verificou-se que o conjunto de medidas de eficiência propostas apresentam VPLs que variam entre R\$43.000 e R\$60.000. Os resultados de esta pesquisa podem auxiliar como base comparativa para estudos sobre NZEBs residenciais de baixo custo, assim como no estabelecimento de índices de desempenho mínimos para NZEBs, os quais verificaram-se escassos em países com climas quentes.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

PALAVRAS-CHAVE: edificação energia zero; casa contêiner; otimização baseada em simulação.

URDANGARIN, Melanie G. G. M.S. State University of West Paraná, March 2020.
Simulation-based optimization project of a shipping container home with net-zero energy target applied to different Brazilian climates. Adviser: Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira. Co-advisers: Carlos E. C. Nogueira, Luciene K. Tokura.

ABSTRACT

One of the keys to meeting the increased demand for electricity is the construction of more energy-efficient buildings. For this reason, in a worldwide scenario, the current civil construction target is the conception of net-zero energy buildings (NZEB). In order to fill the lack of studies on low cost NZEBs in hot climates, this work aims to propose a single-family housing project constructed in shipping containers, with net-zero energy target. The methodology comprises, definition of the simulation-based model in EnergyPlus; minimization of the objective functions: energy consumption and difference in life cycle cost, using GenOpt; a thermal comfort analysis; and calculation of solar systems. Through the optimization, reductions of 14 to 27% for air conditioning and lighting were obtained, and an average decrease of 11 and 23% in the discomfort hours, using the Fanger and adaptive models, respectively. In addition, air conditioning consumption, when the comfort temperature depends on the adaptive model, was reduced by 30 to 37%. The solar systems calculated can supply the energy demand of the proposed buildings, accomplishing this way, the net-zero energy goal. The financial analysis demonstrated that the net present value of the efficiency measures proposed ranges from R\$ 43,000 to 60,000. The results of this research can help as a comparative basis for studies on low-cost residential NZEBs conducted in countries with warm-hot climates; as well as for aiding in the establishment of minimum energy performance indices, which were found to be scarce.

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

KEYWORDS: net-zero energy building; shipping container home; simulation-based optimization.

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1.	EDIFICAÇÕES SUSTENTÁVEIS	4
2.2.	EDIFICAÇÕES BASEADAS EM CONTEINÊRES MARÍTIMOS – EBCMs.....	7
2.2.1.	Disponibilidade dos CMs	7
2.2.2.	Modularidade na arquitetura	8
2.2.3.	Transportabilidade dos CMs – construção <i>off-site</i>	10
2.2.4.	EBCMs como opção para projetos habitacionais de caráter social	10
2.2.5.	Desafios na utilização de CMs.....	11
2.2.6.	Aspectos técnicos dos CMs conforme a ISO.....	11
2.2.7.	Estudos conduzidos com EBCMs.....	12
2.3.	CONCEITOS ENVOLVIDOS NO PROJETO DE UM NZEB	19
2.3.1.	Estratégias de desenho passivas	19
2.3.2.	Medidas de eficiência ativas	25
2.3.3.	Conforto térmico	27
2.3.4.	Avaliação econômica.....	29
2.4.	NORMAS DE DESEMPENHO.....	29
2.4.1.	NBR 15220-3.....	30
2.4.2.	NBR 15575.....	30
2.5.	MODELAGEM, SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE ENERGIA NAS EDIFICAÇÕES	35
2.5.1.	Fases dos estudos de OBS	37
2.5.2.	Algoritmos de otimização aplicáveis na OBS.....	38
2.5.3.	Ferramentas de simulação e motores da otimização	40

3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	42
3.1.	DELINEAMENTO GERAL	42
3.2.	DEFINIÇÃO GEOMÉTRICA DO MODELO BASE	44
3.2.1.	Tipo de contêiner	44
3.2.2.	Distribuição dos ambientes internos	44
3.2.3.	Número de contêineres	45
3.2.4.	Forma do arranjo	45
3.2.5.	Orientação e aberturas	46
3.2.6.	Geometrias adotadas	46
3.3.	DEFINIÇÃO DOS MATERIAIS CONSTRUTIVOS.....	47
3.3.1.	Procedimento 1 – Simplificado	48
3.3.2.	Procedimento 2 – Simulação	49
3.4.	DEFINIÇÃO DAS CARGAS INTERNAS.....	55
3.4.1.	Ocupação de pessoas	55
3.4.2.	Iluminação.....	56
3.4.3.	Equipamentos elétricos	59
3.5.	DEFINIÇÃO DO SISTEMA DE AR-CONDICIONADO	60
3.5.1.	Simulação em <i>autosized</i>	60
3.5.2.	Simulação dos modelos comerciais.....	61
3.6.	CARACTERÍSTICAS DAS ZONAS BIOCLIMÁTICAS EM ANÁLISE	62
3.7.	DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DA OTIMIZAÇÃO DO MODELO BASE	64
3.7.1.	Funções objetivo a serem minimizadas	65
3.7.2.	Variáveis a serem otimizadas.....	73
3.7.3.	Algoritmos.....	77
3.8.	VERIFICAÇÃO DA VENTILAÇÃO NATURAL	78
3.8.1.	Variáveis para o cálculo da porcentagem de abertura.....	80
3.8.2.	Exemplo de cálculo para a zona bioclimática 8	83

3.9.	AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO	85
3.9.1.	Cálculo do consumo do modelo otimizado com conforto (MOC)	86
3.10.	CÁLCULO DO SISTEMA DE AQUECIMENTO DE ÁGUA SOLAR (SAS)....	87
3.10.1.	Metodologia manual: NBR15569	88
3.10.2.	Metodologia computacional	92
3.11.	CÁLCULO DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS (SF)	95
3.11.1.	Sistemas fotovoltaicos isolados (SFIs)	95
3.11.2.	Sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCRs)	107
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	112
4.1.	RESULTADOS DA DEFINIÇÃO DO MODELO BASE	112
4.2.	RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO BASEADA EM SIMULAÇÃO	114
4.2.1.	Resultado da aplicação de diferentes algoritmos	114
4.2.2.	Resultados da otimização para as 8 zonas bioclimáticas	115
4.2.3.	Resultados da comprovação da ventilação natural	119
4.2.4.	Resultados do consumo do modelo otimizado retificado (MO _{ACH})	120
4.3.	RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO	121
4.3.1.	Consumo do modelo otimizado com conforto (MOC)	125
4.4.	RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO DO SAS	126
4.4.1.	Retificação do consumo para aquecimento de água	128
4.5.	RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO DOS SFVs	129
4.5.1.	Sistemas fotovoltaicos isolados (SFIs)	129
4.5.2.	Sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCRs)	131
4.6.	ANÁLISE FINAL DAS PROPOSTAS	134
4.6.1.	Avaliação econômica	134
4.6.2.	Comparação com índices de NZEB	136
5.	CONCLUSÕES	141
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	144

1. INTRODUÇÃO

O ambiente construído é componente fundamental do desenvolvimento econômico e social, envolvendo o consumo de uma grande quantidade de energia e materiais. Em 2018, o consumo de energia elétrica brasileiro correspondeu a 535,4 GWh, dos quais 271,0 GWh (50,6%) foram consumidos em edificações, sejam de caráter residencial, comercial ou público. Particularmente, o setor residencial foi responsável por 136,2 GWh, representando 50,3% do consumo total das edificações (EPE, 2019). Além disso, até 2050 prevê-se um aumento de 39 milhões no número de domicílios, ao passo que prognostica-se que o consumo residencial se eleve para 219,4 GWh (taxa de 1,7 % a.a.) (MME, 2015). Em termos de participação de equipamentos no uso final do setor residencial, os condicionadores de ar passaram a apresentar contribuição significativa, saltando de 7% em 2005 para 14% em 2017 (EPE; MME, 2018). Espera-se que esta participação triplique, sendo incorporadas 48 milhões de novas unidades até 2050; decorrente principalmente do crescimento da população, elevação da renda e maior preferência dos indivíduos por ambientes climatizados (EPE; MME, 2018; MME, 2015).

As edificações também são o maior consumidor de energia elétrica a nível mundial, contribuindo com aproximadamente metade da demanda. De acordo com a *International Energy Agency* - IEA (2018), haverá um aumento de 60% no consumo em edificações até 2040, significando 55% do crescimento da demanda elétrica global. Dentro dessa projeção, o setor residencial apresentará a expansão mais significativa, colaborando com 70% do crescimento da demanda em edificações. Novamente a refrigeração é a que apresentará uma ampliação mais acentuada no uso final, contando com um crescimento de cerca de 3,5% anual (IEA, 2018).

As principais estratégias para conseguir satisfazer o crescimento permanente da demanda são a construção de edificações mais eficientes do ponto de vista térmico e do uso de equipamentos, bem como na geração renovável distribuída. Dentro deste cenário, os Edifícios Energia Zero (*Net Zero Energy Buildings* - NZEBs) vem ganhando mercado a nível mundial. Por exemplo, na União Europeia (UE) foi estabelecido como meta que todos os novos edifícios até 2020 sejam NZEB (EU, 2010). Nos EUA foi estabelecido que 50% dos novos edifícios comerciais sejam NZEB até 2040; e que as

novas construções de prédios públicos sejam NZEB a partir de 2030 (CRAWLEY; PLESS; TORCELLINI, 2009; IPEEC, 2018).

Os principais obstáculos para o desenvolvimento dos NZEBs são os altos custos iniciais e a necessidade de estudos especializados que abrangem conhecimento específico. As Edificações Baseadas em Contêineres Marítimos (EBCMs) apresentam-se como uma possível solução a estes quesitos. Sua modularidade facilita a padronização, o qual se traduz na possibilidade de criação de modelos de habitação industrializados, adequados aos diferentes climas e por um menor custo. Para avançar em direção à padronização, são necessários estudos focados em identificar as características que otimizam o comportamento dos modelos de habitação para as diferentes regiões climáticas.

Por meio da revisão bibliográfica, verificou-se a existência de literatura limitada sobre NZEBs feitos a partir de CMs, assim como de simulação dinâmica de EBCMs aplicada em diversos climas. Existe também uma carência de estudos sobre otimização matemática de EBCMs, sendo esta lacuna apontada de maneira explícita no *review* sobre perspectivas das NZEBs transportáveis (KRISTIANSEN; MA; WANG, 2019). Estudos de otimização baseada em simulação e NZEBs para climas quentes verificaram-se escassos (NGUYEN; REITER; RIGO, 2014). Também, foi constada a necessidade urgente de uma definição de NZEBs universal, grande porção dos países, com ênfase em aqueles de climas quentes, não possuem normas de desempenho para definir um NZEBs (WILLIAMS et al., 2016). A fim de preencher a falta de estudos apontada e avançar no sentido da padronização das construções residenciais energia zero, o presente trabalho tem por objetivo propor um projeto de habitação unifamiliar em contêineres do tipo NZEB, desenvolvido através do uso de otimização baseada em simulação (OBS) para cada zona bioclimática brasileira. Metas adicionais da dissertação são, para cada modelo de edificação proposto, conduzir de maneira comparativa, para climas que variam de temperados a quentes: uma análise do conforto térmico comparando os modelos de Fanger e adaptativo; determinar a influência da temperatura de conforto no consumo energético, quando utilizado o modelo adaptativo; e verificar o tamanho dos sistemas solares *on-grid* e *off-grid* necessários para suprir a demanda por energia elétrica. Finalmente, avaliar desde um posto de vista financeiro, o total de medidas de eficiência adotadas.

Com base na pesquisa bibliográfica realizada, este trabalho é o primeiro em otimizar matematicamente um modelo de simulação dinâmica de uma EBCM. No Brasil o incentivo das NZEBs ainda não é uma meta do governo (EPE; MME, 2017); dada esta situação, este trabalho representa uma tentativa na promoção do desenvolvimento das NZEBs. Além disso, esta pesquisa identifica e ajuda a promover práticas eficientes para a construção em CMs, incentivando a inclusão de este tipo de edifício sustentável como alternativa à construção convencional.

Para atingir as metas propostas, o trabalho encontra-se dividido em três grandes capítulos: revisão bibliográfica, metodologia e resultados e discussões. Na revisão bibliográfica é apresentada uma base para a compreensão de como as EBCM se enquadram dentro dos princípios da construção sustentável, um delineamento das características da construção em CMs e uma revisão da literatura disponível. Posteriormente, são apontadas as principais estratégias construtivas e conceitos a serem considerados em um projeto de edificação sustentável; assim como uma síntese dos princípios da OBS.

A metodologia começa resumindo as etapas do trabalho de maneira concisa e sequencial. Seguidamente, detalha os procedimentos e considerações necessários para consolidar cada uma das etapas: desenvolvimento do modelo base de simulação dinâmica, definição dos parâmetros da otimização, verificação da ventilação natural e conforto térmico, e cálculo dos sistemas solares para aquecimento de água e geração de energia. Posteriormente, os resultados da elaboração dos modelos de edificação energia zero são apresentados de forma comparativa por zona bioclimática (ZB) e na mesma sequência de etapas definidas na metodologia.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As mudanças climáticas e o aquecimento global estão estreitamente relacionados ao consumo de energia e às emissões de Gases de efeito estufa (GEE). A construção civil representa 50% do consumo total de energia elétrica e 19% das emissões de GEE (IEA, 2018; IPCC, 2015). Além disso, a indústria da construção civil consome numerosos recursos naturais ao passo que gera grande quantidade de resíduos, representando cerca de 50% da massa de resíduos sólidos urbanos (CARBONARI; BARTH, 2015; ISLAM *et al.*, 2016; NEJAT *et al.*, 2015). Uma diminuição significativa de energia, recursos e emissões pode ser alcançada através dos edifícios se estes forem projetados, construídos e operados adequadamente. Por esta razão, atualmente, um dos maiores desafios da indústria da construção civil é a sustentabilidade do parque imobiliário (CAO; DAI; LIU, 2016; WEISSENBERGER; JENSCH; LANG, 2014).

2.1. EDIFICAÇÕES SUSTENTÁVEIS

Historicamente o conceito de desenvolvimento sustentável (DS) emergiu no contexto das preocupações ambientais, as quais foram abordadas no relatório Nosso Futuro Comum (CASSEN, 1987) e detalhadas na Agenda 21 da Cúpula da Terra (UN, 1992). Esta foi a primeira tentativa de conciliar dois paradigmas aparentemente contrastantes: crescimento econômico duradouro e proteção eficiente do meio ambiente e dos recursos naturais. Posteriormente, a Cúpula Mundial sobre Desenvolvimento Social em Copenhague em 1995 enfatizou o papel fundamental do DS em assegurar o desenvolvimento social global. Este novo pilar social recebeu especial atenção no documento final da Rio + 20 “O Futuro que Queremos” (UN, 2012).

A construção sustentável é um subconjunto do DS e aborda o papel do ambiente construído em contribuir para a visão de sustentabilidade. O movimento da construção sustentável abrange uma série de definições (KIBERT, 2016):

- Construção sustentável:

Em 1994 o Conselho Internacional de Redes de Pesquisa em Construção (*Conseil International du Bâtiment* - CIB) definiu a construção sustentável como criar

e operar um ambiente saudável, construído com base na eficiência de recursos e com desenho ecológico. O CIB estabeleceu os sete princípios Figura 1, os quais auxiliam na tomada de decisão em cada fase do processo de desenho e construção, e aplicam ao longo de toda a vida útil da edificação. Além disso, estes princípios auxiliam na avaliação dos recursos necessários para construir e operar a edificação durante sua vida útil: terra, materiais, água, energia e ecossistemas.

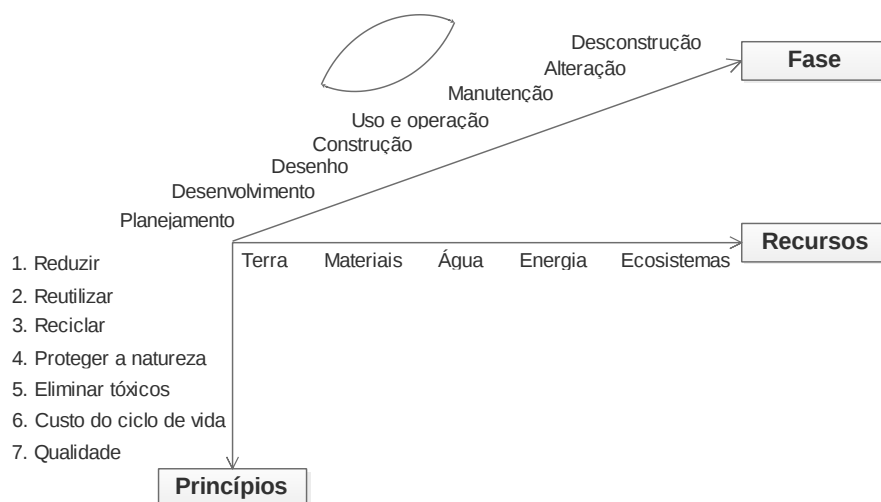


Figura 1: Pilares da construção sustentável desenvolvidos pelo CIB.
Fonte: Adaptado de (KIBERT, 2016).

- Edifícios verdes (*green buildings*):

Edifícios verdes são aqueles desenhados aplicando os princípios da construção sustentável. No entanto, a grande maioria das edificações verdes apresentam melhorias com relação aos métodos tradicionais de construção, mas não um desvio radical que englobe todos os princípios da sustentabilidade em cada uma das fases e recursos envolvidos ao longo da vida útil (KIBERT, 2016).

- Edifícios de alta performance (*high-performance buildings*):

Uma edificação de alta performance utiliza o projeto de construção de forma integral para obter desempenho energético, econômico e ambiental substancialmente melhor que a prática padrão. A modo de exemplo, uma estratégia avançada de iluminação natural reduz o uso de luminárias durante o dia, o qual diminui a carga de resfriamento de pico diurna, justificando uma redução no tamanho do sistema de resfriamento mecânico. Isso, por sua vez, resulta em redução de gastos de capital e menores custos de energia ao longo do ciclo de vida (KIBERT, 2016).

- Edifícios energia zero (*NZEBs*):

Um NZEB é um edifício com necessidades energéticas extremamente reduzidas o qual possibilita um balanço nulo ao longo do ano entre a demanda energética e a produção através de tecnologias renováveis (ALIREZAEI; NOORI; TATARI, 2016; ATHIENITIS; O'BRIEN, 2015; PLESS; TORCELLINI, 2009).

No panorama internacional, vários países tem emitido diretivas visando reduzir o consumo energético das novas construções através do conceito de NZEBs. Na União Europeia (EU) foi estabelecido como meta que todos os novos edifícios até 2020 sejam NZE (EU, 2010). Nos Estados Unidos foi estabelecido que 50% dos novos edifícios comerciais sejam NZE até 2040; e que as novas construções de prédios públicos sejam NZE a partir de 2030 (CRAWLEY; PLESS; TORCELLINI, 2009; IPEEC, 2018). O plano quinquenal da China de 2016 a 2020 inclui a exigência de que 50% de todos os novos edifícios urbanos sejam certificados como edifícios verdes, incluindo além dos requisitos de eficiência energética, eficiência no uso da água, materiais, aprimoramento do ambiente interno e redução da geração de resíduos (MOLINAROLI, 2017).

No entanto, nos países em desenvolvimento ainda existem barreiras ao crescimento dos NZEBs, principalmente devido ao alto investimento inicial, falta de incentivo e atitude social menos positiva (CAO; DAI; LIU, 2016). Cabe salientar que as economias em desenvolvimento são as que dominam o crescimento da demanda global de eletricidade, respondendo por quase 90% do crescimento até 2040 (IEA, 2018). No caso do Brasil, diretrizes com relação à NZEB são ainda inexistentes. Como indica o Plano Decenal de Expansão de energia, faltam requisitos mínimos nos códigos municipais e normas de desempenho mínimo para edificações (EPE; MME, 2017).

Dentro da construção sustentável, um tipo de arquitetura emergente que tem mostrado grande potencial são as Edificações Baseadas em Contêineres Marítimos (EBCMs). Apesar das EBCMs também precisarem de um projeto energético e ambientalmente consciente para serem sustentáveis, o uso de contêineres marítimos (CMs) na arquitetura apresenta uma série de particularidades que são por natureza concordantes com os princípios da sustentabilidade: redução, reuso, reciclagem, proteção da natureza, redução de custos do ciclo de vida e qualidade. Logo, as EBCMs encontram-se em vantagem com relação aos projetos de construções

sustentáveis em alvenaria. No que segue, as características da arquitetura em contêineres são abordadas em maior detalhe.

2.2. EDIFICAÇÕES BASEADAS EM CONTEINÊRES MARÍTIMOS – EBCMs

Nos últimos anos, a reutilização de CMs na arquitetura cresceu em popularidade em todo o mundo, tornando-se uma das maiores tendências de construção de residências e escritórios (ELRAYIES, 2017; KING *et al.*, 2018; SUN; MEI; NI, 2017). O emprego de este tipo de construção estendeu-se também nos setores comercial e público; exemplos da sua aplicação são: hotéis, instalações educacionais, bibliotecas, postos de saúde móveis, abrigos de emergência após desastres naturais, acampamentos militares, entre outros (BERBESZ; SZEFER, 2018; BERNARDO *et al.*, 2013; KRISTIANSEN; MA; WANG, 2019; TANYER; TAVUKCUOGLU; BEKBOLIEV, 2018).

Do mesmo modo, a nível nacional observa-se uma tendência ao aumento e diversificação dos projetos em CMs, direcionados em grande parte ao uso comercial; devido às vantagens deste tipo de obra, à crescente aceitação por parte da população, ao aumento do número de empresas especializadas na área e em função da disponibilidade (CARBONARI; BARTH, 2015; GUEDES; BUORO, 2015).

2.2.1. Disponibilidade dos CMs

Os CMs são utilizados em média pelo período de 10 anos (BERBESZ; SZEFER, 2018; GRANT, 2012). Uma vez cumprida sua finalidade, o transporte sem carga para o porto de origem não é rentável, consequentemente um enorme excedente de CMs vazios são armazenados nos portos esperando pela reciclagem ou reutilização, especialmente nos países importadores (ELRAYIES, 2017; ISLAM *et al.*, 2016; KING *et al.*, 2018; OLIVAS *et al.*, 2013). Os portos ao redor do mundo armazenam mais de 30 milhões de unidades vazias, ao passo que a cada ano mais de um milhão de módulos são descartados (BERBESZ; SZEFER, 2018; SUN; MEI; NI, 2017).

A reciclagem de um CM exige o uso de 8.000 kWh de energia elétrica para converte-lo em blocos de aço, enquanto que o processo para reutilização na construção implica apenas 400 kWh, 5% da energia necessária para derreter o

material (BERBESZ; SZEFER, 2018; ISLAM *et al.*, 2016). Dado que reciclar o superávit de CMs implicaria em enormes quantias de energia para derreter o aço, a reutilização para fins construtivos é vista como a solução mais atraente ao problema logístico do acúmulo (ISLAM *et al.*, 2016; BOWLEY; MUKHOPADHYAYA, 2017).

O Brasil encontra-se no posto 21 do ranking mundial de movimentação de contêineres, ao passo que possui um setor portuário composto por 175 instalações, 99 distribuídas ao longo da costa e 76 dentro fora do litoral (ANTAC, 2019; CBIE, 2019). Segundo a Agência Nacional de Transportes Aquaviários - ANTAC (2019), a cabotagem de contêineres apresenta um crescimento médio anual de 11,9 % (período 2010-2018). Com base nestas informações, pode-se prever um aumento do número de contêineres descartados no país, gerando condições propícias para sua reutilização na arquitetura.

2.2.2. Modularidade na arquitetura

O conceito da modularidade na arquitetura está experimentando um crescimento significativo (TUMMINIA *et al.*, 2018). Este crescimento aponta à simplificação dos projetos, utilização da mão de obra e recursos de forma eficiente, diminuição do tempo de construção, melhoras da qualidade dos produtos e maximização os benefícios econômicos (SUN; MEI; NI, 2017). A produção de unidades modulares padronizadas também possibilita a coleção de dados de operação para validar futuras simulações a fim de conceber melhorias. Além disso, em um edifício padronizado é possível investir nas instruções do usuário para maximizar a eficiência não só através das práticas construtivas, mas também a partir dos hábitos de uso (KRISTIANSEN; MA; WANG, 2019).

A construção em CMs é em essência modular, estima-se que a mesma possibilita uma economia de tempo de aproximadamente 60%, menor necessidade de mão-de-obra local, assim como flexibilidade no arranjo para suportar mudanças no design e possíveis ampliações (ISLAM *et al.*, 2016; KING *et al.*, 2018; SUN; MEI; NI, 2017). Em termos de resistência e durabilidade, os CMs suportam um empilhamento de até 6 unidades totalmente carregadas, possibilitando a construção de edifícios de vários andares (ISMAIL *et al.*, 2015). Além disso, o seu uso pode aumentar a vida útil do projeto em até 40% (SUN; MEI; NI, 2017).

Do mesmo modo, as EBCMs também apresentam custo de construção comparativamente baixo; devido à estrutura ser feita de um material reciclável, às fundações serem simples e à menor necessidade de mão-de-obra (BERBESZ; SZEFER, 2018; CHOW; REN; MATHIAS, 2019). No Brasil, estima-se que através do uso de CMs o custo da obra é reduzido em aproximadamente 35% (GUEDES; BUORO, 2015). Esta redução de custos é particularmente importante para o caso dos NZEB, uma vez que a sua principal barreira é o alto investimento inicial, estimado como sendo 40% superior ao de uma edificação tradicional (KRISTIANSEN; MA; WANG, 2019).

A análise de energia do ciclo de vida (life cycle energy analysis – LCEA) é usada para avaliar o impacto ambiental dos edifícios. A mesma considera todas as entradas de energia em um sistema durante seu ciclo de vida; sendo estas: energia para fabricação (energia incorporada), uso (energia operacional) e demolição. A fase de fabricação inclui a fabricação e transporte de materiais para construção e renovação. A fase de operação inclui todas as atividades relacionadas ao uso dos edifícios (aquecimento, resfriamento, iluminação, eletrodomésticos, cozimento, água quente). E a fase de demolição inclui a destruição da construção e o transporte de materiais desmontados para aterros sanitários ou usinas de reciclagem (ATMACA; ATMACA, 2016).

Durante a fase de fabricação, edifícios modulares possuem menores impactos ambientais em relação aos convencionais. Kim (2008) calculou que a demanda de energia e o potencial de aquecimento global da fase de construção de um edifício modular são 26% e 50% inferiores aos de um edifício convencional, respectivamente. Particularmente o uso de CMs é considerado uma estratégia significativa para reduzir a energia incorporada nos materiais de construção (GRANT, 2012; ISLAM *et al.*, 2016). Com relação à fase operacional, estima-se que esta responde por 80-90% dos impactos ao longo da vida útil do projeto. Portanto, reduzir os requisitos energéticos durante a fase de operação é o aspecto mais importante para atingir projetos energeticamente eficientes ao longo do ciclo de vida. Relativo à produção de resíduos, construções pré-fabricadas oferecem quantidades limitadas em comparação com edifícios tradicionais; sendo que às EBCMs são capazes de gerar uma quantidade até 70% menor (ISLAM *et al.*, 2016; TUMMINIA *et al.*, 2018).

2.2.3. Transportabilidade dos CMs – construção *off-site*

Outra característica da construção em CMs é a transportabilidade, que somada à possibilidade de implementar tecnologias renováveis para funcionar como unidade autônoma fora da rede, converte este tipo de habitação em uma solução ideal para uso em regiões rurais afastadas ou instalações para serviços sazonais, como é o exemplo das safras (BERBESZ; SZEFER, 2018; ELRAYIES, 2017; ISMAIL *et al.*, 2015; SUN; MEI; NI, 2017). Portanto, o mercado-alvo são principalmente áreas rurais onde estes edifícios podem melhorar o padrão de vida fornecendo acesso à eletricidade e inclusive a oportunidade de criação de microgrids (KRISTIANSEN; MA; WANG, 2019). Cabe ressaltar que a diminuição dos preços das baterias para sistemas fotovoltaicos (SFs) esta originando um momento oportuno para o desenvolvimento das NZEBs *off-grid* (KRISTIANSEN; MA; WANG, 2019).

2.2.4. EBCMs como opção para projetos habitacionais de caráter social

EBCMs são consideradas uma escolha flexível para atender países com carências sociais, como é o caso da falta de moradia, necessidade de habitações provisórias ou pós-desastre, assim como fortalecimento de comunidades através do desenvolvimento de infraestrutura (ELRAYIES, 2017; SCHIAVONI *et al.*, 2016). Em todo o mundo existem programas socialmente inovadores e bem sucedidos que estão usando EBCMs como uma abordagem econômica e ecologicamente correta para preencher necessidades de bem-estar social e educacional (CHOW; REN; MATHIAS, 2019).

Um dos problemas que o Brasil enfrenta atualmente é o déficit habitacional, o mesmo é estimado em 7,77 milhões de unidades, sendo este número um recorde na série histórica (ABRAINC, 2018). Este valor evidencia a necessidade de priorizar programas voltados para sanar as necessidades habitacionais, principalmente para as faixas de renda mais baixas (ABRAINC, 2018). Por sua flexibilidade e baixo custo, a reutilização de CMs pode ser uma das opções viáveis para preencher esta demanda por novos domicílios.

2.2.5. Desafios na utilização de CMs

A nível técnico, um dos maiores desafios é a adaptação do envelope às condições climáticas locais. Dada a alta condutividade térmica do aço, o interior de um CM ganha temperaturas extremamente altas no verão e baixas no inverno; logo, um projeto termicamente correto é essencial a fim de fornecer um ambiente interno adequado (BERBESZ; SZEFER, 2018; ISLAM *et al.*, 2016).

No tocante às diretrizes construtivas, na maioria dos países uma das principais dificuldades da construção em CMs é a falta de códigos específicos (ISLAM *et al.*, 2016). Este também é o caso do Brasil, onde as normas vigentes abrangem todas as edificações residências no geral, sem nenhuma especificidade relativa ao uso de CMs. Como exemplo, tem-se a norma de desempenho NBR 15575:2013 utilizada como guia neste trabalho (AMORIM *et al.*, 2018).

2.2.6. Aspectos técnicos dos CMs conforme a ISO

O desenho e requerimentos estruturais dos CMs são definidos através de uma série de normas ISO, dentre as quais são relevantes ao presente trabalho:

- *ISO 668:1995 Series 1 freight containers - Classification, Dimensions and Ratings* (STANDARDIZATION, 2013)
- *ISO 1496-1: Series 1 Freight Containers – Specification and Testing - Part 1, General Cargo Containers* (STANDARDIZATION, 1990)

No mercado existem contêineres de diversas dimensões, os mais comumente utilizados possuem comprimentos de 6,0; 9,0 e 12,0 m e alturas de 2,4; 2,6 e 2,9 m. Como indica a Tabela 1, na construção civil os modelos mais amplamente empregados são os de 6,0 ou 12,0 m de comprimento e 2,9 m de altura, devido ao maior pé direito proporcionado e exigido pelas normas construtivas (ISMAIL *et al.*, 2015). Este tipo de contêiner é chamado *High Cube* (HC) e comercialmente designado como 20'HC ou 1CCC – 6 m e 40'HC ou 1AAA – 12 m (BERNARDO *et al.*, 2013).

Tabela 1: Classificação e dimensões nominais dos ISO CM utilizados na construção
Fonte: (STANDARDIZATION; 1990, 2013)

Modelo	Comprimento (m) Interno/externo	Largura (m) Interno/externo	Altura (m) Interno/externo	Volume (m³)
40'HC / 1AAA	11,998 / 12,192	2,33 / 2,438	2,71 / 2,896	37,41
20'HC / 1CCC	5,867 / 6,058	2,33 / 2,438	2,71 / 2,896	76,10

Medidas mínimas da abertura da porta: altura x largura = 2,566 x 2,286 m

Os CMs são feitos de aço tipo *corten*, o que garante uma alta resistência à corrosão. Como indica a Figura 2, um CM inclui o uso de chapas metálicas trapezoidais para formar as paredes e o teto, suportadas por marcos e trilhos, e uma grade para sustentar o piso de madeira. As chapas metálicas possuem 2 mm de espessura, e a sua profundidade varia entre 25, 30 e 50 mm. O piso é de madeira compensada especial para ambiente marítimo e possui 28 mm de espessura (ELRAYIES, 2017; ISMAIL *et al.*, 2015; RSCP, 2017).

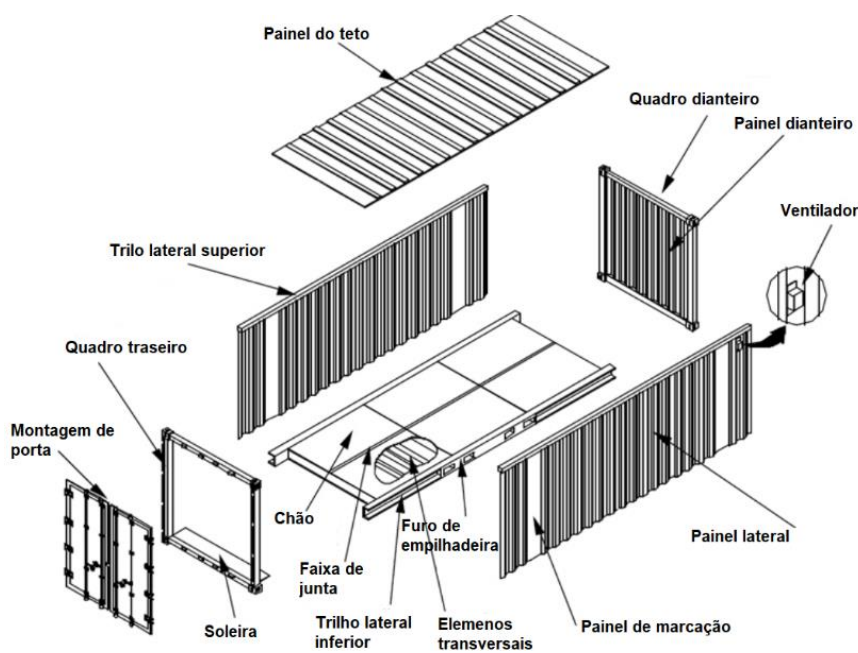


Figura 2: Vista axonométrica explodida de um contêiner típico ISSO 20'.
Fonte: Adaptado de RSCP (2017).

2.2.7. Estudos conduzidos com EBCMs

Para fornecer uma visão geral dos trabalhos disponíveis sobre EBCMs, foi realizado um levantamento bibliográfico na plataforma Scopus - o maior banco de

dados de resumos e citações revisados por pares. Foram utilizadas as seguintes 9 combinações de palavras chaves: [shipping container / intermodal steel building unit / container $\cap$ home / architecture / building], para o período 2009-2019. Desta forma foi criada a Tabela 2, onde apresenta-se o resumo dos trabalhos encontrados.

Tabela 2: Levantamento bibliográfico dos estudos sobre EBCMs

ARTIGO	RESUMO	REF.
ASSUNTO	VISÃO GERAL	
<i>InterBoxes: A social innovation in education in rural China</i>	Descreve a implementação do projeto <i>InterBoxes</i> na China, o qual visa melhorar as condições físicas das escolas construindo bibliotecas, salas de aula e demais instalações em CM. Os resultados apontam um grande potencial para melhorar as condições das escolas rurais.	(CHOW; REN; MATHIAS, 2019)
<i>Reutilização de containers marítimos na construção de residências: benefícios no consumo dos recursos e geração de resíduos sólidos</i>	Caso estudo no qual se compara o desempenho de uma residência em CM e uma em concreto armado com relação ao tempo de execução da obra, custo e resíduos gerados.	(AMORIM <i>et al.</i> , 2018)
<i>Innovations in shaping the residential and retail buildings. Functional and pro-environmental potential of shipping containers in architecture</i>	Enfoca-se nos aspectos pró-ambiental e econômico dos CMs como objetos arquitetônicos, no exemplo da Polônia e a nível mundial.	(BERBESZ; SZEFER, 2018)
<i>Feasibility of using ISO shipping container to build low cost house in Malaysia</i>	Foi feita uma pesquisa através de questionários para identificar o nível de aceitação do uso de CM na construção de casas de baixo custo na Malásia, obtendo-se por resultado uma aceitação de 45%.	(KING <i>et al.</i> , 2018)
<i>The use of intermodal steel building unit (ISBU) for the provision of</i>	Mostra uma visão geral do uso dos CM por meio das perspectivas dos profissionais da construção e identifica os desafios associados	(NDUKA <i>et al.</i> , 2018)

<i>habitable homes: Enablers and challenges</i>	ao seu uso visando reduzir o déficit habitacional na Nigéria.	
<i>Overview of Modular Design Strategy of the Shipping Container Architecture in Cold Regions</i>	Analisa as vantagens de aplicar a arquitetura em CMs em regiões frias, assim como as estratégias do design modular.	(SUN; MEI; NI, 2017)
<i>Reutilização de Contêineres padrão ISO na construção de edifícios comerciais no sul do Brasil</i>	Buscou-se avaliar os principais parâmetros construtivos e adequações necessárias em três edificações comerciais em CMs, situadas na região sul do Brasil.	(CARBONARI; BARTH, 2015)
<i>Container architecture in the hot-humid tropics: potential and constraints</i>	É uma pesquisa bibliográfica que discute o potencial e as restrições da implementação da arquitetura de contêineres nos climas secos e úmidos.	(ISMAIL <i>et al.</i> , 2015)
<i>Reutilização de containers de armazenamento e transporte como espaços modulados na arquitetura</i>	Pesquisa de caráter exploratório bibliográfico na qual buscou-se analisar as características da reutilização de CM na arquitetura, levando em consideração questões técnicas, funcionais e estéticas.	(OCCHI; ROMANINI, 2014)
<i>Using shipping containers to provide temporary housing in post-disaster recovery: Social case studies</i>	É uma pesquisa de abordagem qualitativa que se concentra em experiências reais pós-desastre para avaliar fatores sociais significativos para o sucesso dos projetos de construção temporária em contêineres.	(ZHANG; SETUNGE; ELMPT, 2014)
<i>Plug and play – Modular Building solutions to reduce lead time, cost and increase flexibility</i>	Fornece uma visão geral dos benefícios da aplicação de contêineres para construção modular em indústrias pesadas.	(OLIVAS <i>et al.</i> , 2013)
<i>Shipping containers for a sustainable habitat perspective</i>	Descreve um projeto alemão que se concentra no reaproveitamento de CM visando a consciência ambiental e a potencialização da sua capacidade inovadora dentro da sociedade alemã.	(ABRASHEVA; SENK; HÄUSSLING, 2012)
<i>"Pack 'em, rack 'em and stack 'em": The Appropriateness of the Use and Reuse of</i>	São analisados os impactos financeiros, funcionais, estruturais, técnicos, ambientais e arquitetônicos do uso de contêineres na construção de presídios.	(GRANT, 2012)

<i>Shipping Containers for Prison Accommodation</i>		
<i>Shipping containers as building components</i>	Fornece uma visão da viabilidade de usar CMs na construção civil em Reino Unido, através da avaliação de múltiplos casos estudos com relação ao transporte empregado, métodos construtivos, locais de instalação e finalidade de uso, assim como uma análise do Regulamento de Construção para identificar obstáculos técnicos.	(SMITH, 2006)
ASSUNTO	PROJETO DE EDIFICAÇÃO E ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO	
<i>Assessing the airtightness performance of container houses in relation to its effect on energy efficiency</i>	Examina o desempenho de estanqueidade de quatro tipos de habitações em contêineres e seu impacto na eficiência energética, através do método de teste do ventilador e da termografia infravermelha.	(TANYER; TAVUKCUOGLU; BEKBOLIEV, 2018)
<i>Thermal Performance Assessment of Shipping Container Architecture in Hot and Humid Climates</i>	Apresenta uma análise feita através de Ecotect do desempenho térmico de EBCMs utilizando diferentes isolantes, em Port Said, Egito, um clima quente e úmido.	(ELRAYIES, 2017)
<i>Avaliação do desempenho térmico de habitação utilizando containers</i>	Foi proposto um modelo unifamiliar de EBCM adequado ao clima de São Paulo e avaliado o desempenho térmico no <i>EnergyPlus</i> de acordo com os requisitos da NBR 15575; adicionalmente foram propostas estratégias de condicionamento passivas.	(COSTA; SOUZA, 2015)
<i>Reuso de containers marítimos na construção civil</i>	Foi avaliado o desempenho térmico de uma EBCM no software Domus/Eletróbrás para a cidade de São Paulo. Como resultado foi obtida a etiqueta da envoltória nível A dentro do Programa Brasileiro de Etiquetagem.	(GUEDES; BUORO, 2015)
<i>Habitação em container: um estudo paramétrico para a zona bioclimática</i> 3	Compara a influência de diferentes parâmetros do envelope sobre os graus-hora de desconforto e consumo energético de um container adaptado à habitação. Foi utilizado o programa OpenStudio e a avaliação foi realizada para a cidade de Porto Alegre.	(KREBS; MOURA; CUNHA, 2015)

	Como resultado foi obtida uma redução de 21,6 % no consumo energético total.	
<i>A performance comparison of ordinary and container classrooms in Austria</i>	Compara o ambiente interno de salas de aula comuns e feitas em CMs em várias escolas na Áustria. Temperatura, umidade relativa e concentração de dióxido de carbono foram medidas. Os resultados do estudo sugerem um desempenho ambiental interno ligeiramente inferior das escolas de contêineres em comparação com as escolas comuns.	(KAVEH; MAHDAVI, 2014)
<i>Towards sustainable architecture – a case with Greentainer</i>	Estuda uma EBCM localizada no clima tropical quente e úmido de Chennai, na Índia. Foi feita uma comparação entre a energia incorporada em uma EBCM e em um edifício convencional. Adicionalmente, compara-se o desempenho térmico das duas edificações através de medidas de temperatura do ar interior. Verificou-se que o comportamento do EBCM não é inferior ao edifício convencional.	(VIJAYALAXMI, 2010)
ASSUNTO	EBCMs ENERGIA ZERO	
<i>Perspectives on industrialized transportable solar powered zero energy buildings</i>	Discute-se como a produção automatizada de edificações modulares padronizadas poderia ajudar a resolver os desafios para atingir EEZs. Um CM foi escolhido como unidade modular objeto de estudo.	(KRISTIANSEN; MA; WANG, 2019)
<i>Sustainable design for an off-grid passive container house</i>	Apresenta um projeto de EBCM residencial autossuficiente, ideal para aplicações rurais off-grid. Foram analisados vários isolantes térmicos e estratégias, e feita uma estimativa de custos em comparação com um modelo de habitação tradicional.	(BOWLEY; MUKHOPADHYAYA, 2017)
<i>A nZEB housing structure derived from end of life containers: Energy, lighting and life cycle assessment</i>	O documento relata o desenho de três modelos de EBCM energia quase zero caracterizados por diferentes áreas e revestimentos externos; assim como os estudos realizados para avaliar a energia, iluminação, e desempenho ambiental e acústico de alguns estudos de caso.	(SCHIAVONI <i>et al.</i> , 2016)

<i>Zero Emission Temporary Habitation: A Passive Container House Acclimatized by Geothermal Water</i>	Foi proposta uma habitação móvel em CM aclimatada pela circulação de água dentro das paredes externas, apresentado um desenho geral do edifício, soluções construtivas para minimizar pontes térmicas e a contribuição energética da produção FV.	(DUMAS <i>et al.</i> , 2014)
ASSUNTO	ANÁLISE DO CICLO DE VIDA	
<i>Comparative life cycle energy and cost analysis of post-disaster temporary housings</i>	Foram analisados dois tipos de moradia típicas para aplicações pós-catástrofes construídas na Turquia. O objetivo do estudo foi identificar desde a perspectiva do LCCA (life-cycle cost analysis) se é mais conveniente utilizar vivendas pré-fabricadas ou construídas em CMs. Os resultados mostram que a fase do ciclo de vida dominante é a operacional e que os alojamentos pré-fabricados têm 25,1 e 29,7% de redução nos requisitos de energia e custo do ciclo de vida, respectivamente.	(ATMACA; ATMACA, 2016)
<i>Life cycle assessment of shipping container home: A sustainable construction</i>	Investiga o uso de CMs como edifícios residenciais e a sua capacidade dentro da construção civil australiana. O foco da pesquisa foi avaliar o ciclo de vida ambiental (<i>Life cycle environmental impacts – LCEI</i>) de uma EBCM através de diversos indicadores. Os resultados mostram que o estágio de operação tem o impacto mais relevante para todos os indicadores.	(ISLAM <i>et al.</i> , 2016)
ASSUNTO	ANÁLISE ESTRUTURAL	
<i>Use of refurbished shipping containers for the construction of housing buildings: details for the structural project</i>	Utiliza análise de elementos finitos para avaliar o aspecto estrutural de um CM e de um estudo de caso de uma vivenda unifamiliar, demonstrando a sua viabilidade construtiva.	(BERNARDO <i>et al.</i> , 2013)
<i>Evaluation, modeling, and analysis of shipping container building structures</i>	Investiga as limitações estruturais dos CM quando utilizados na construção civil, através de modelagem por elementos finitos.	(GIRIUNAS; SEZEN; DUPAIX, 2012)

A partir da análise da literatura disponível sobre EBCMs, podem ser formuladas as seguintes considerações:

- Existem vários trabalhos do tipo revisão bibliográfica que se focam em brindar uma visão geral das características que oferece este tipo de edifício, bem como diferentes aspectos do *design*;
- Estudos mais específicos se focam na análise do desempenho térmico, do ciclo de vida ou da resistência estrutural;
- Trabalhos envolvendo análise do desempenho térmico propõem estudos de casos considerando só um clima específico, geralmente de uma cidade em particular;
- Existem poucos trabalhos exclusivamente de EBCMs do tipo NZE ou *off-grid*;
- Foram encontrados alguns estudos que utilizam modelagem térmica em softwares de simulação dinâmica, contudo não foi constatado nenhum trabalho que utilize como ferramenta a otimização matemática.

Os principais obstáculos para o desenvolvimento dos NZEBs são os altos custos iniciais e a necessidade de estudos especializados que abrangem conhecimento específico. As edificações baseadas em CMs apresentam-se como uma possível solução a estes quesitos; desde que a sua modularidade facilita a padronização, o qual se traduz na possibilidade de criação de modelos de habitação industrializados, adequados aos diferentes climas e por um menor custo. Para avançar em direção à padronização, são necessários estudos focados em identificar as características que otimizam o comportamento dos modelos de habitação para às diferentes regiões climáticas. Verificou-se que há literatura muito limitada sobre NZEBs feitos a partir de CMs, assim como de simulação dinâmica de EBCMs aplicada em diversos climas. Adicionalmente, existe uma carência de estudos sobre otimização matemática de EBCMs, sendo esta lacuna apontada de maneira explícita no *review* sobre perspectivas das NZEBs transportáveis (KRISTIANSEN; MA; WANG, 2019).

A fim de preencher a falta de estudos apontada e avançar no sentido da padronização das construções residenciais NZE; o presente trabalho propõe otimizar matematicamente o envelope de uma EBCMs para cada zona bioclimática brasileira, assim como o cálculo dos sistemas fotovoltaicos *on-grid* e *off-grid* necessários para converter cada modelo de habitação otimizado em NZE. Com base na pesquisa

bibliográfica realizada, este trabalho é o primeiro em otimizar matematicamente um modelo de simulação dinâmica de uma EBCM.

2.3. CONCEITOS ENVOLVIDOS NO PROJETO DE UM NZEB

Projetar um NZEB sustentável exige um delicado equilíbrio entre a geração e consumo de energia, sendo assim, nesta seção são abordados alguns dos conceitos envolvidos nos *designs* energeticamente eficientes e as tendências da minigeração de energia.

2.3.1. Estratégias de desenho passivas

As estratégias passivas incluem todas as estratégias que não requerem energia para operação. A Figura 3 mostra diferentes estratégias passivas utilizadas nos NZEBs; combinando estas técnicas de maneira efetiva será possível obter edificações de baixo consumo energético.

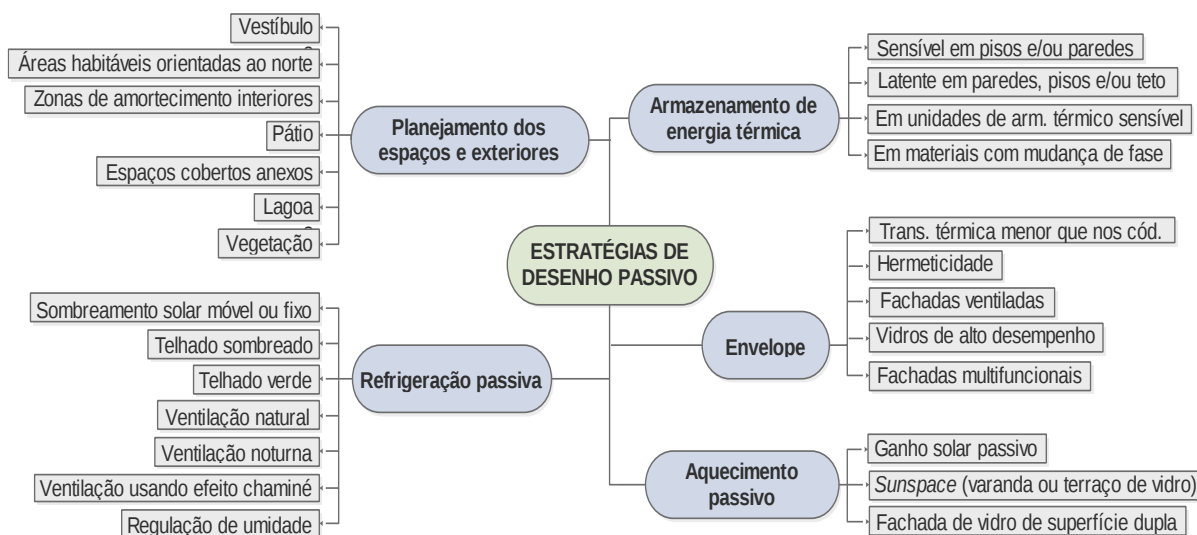


Figura 3: Estratégias de desenho passivas.
Fonte: adaptado de Kristiansen, Ma e Wang (2019).

Algumas das estratégias de desenho passivo amplamente utilizadas e de baixo custo são apresentadas em mais detalhe nos itens que seguem.

2.3.1.1 Iluminação natural e suplementos

A luz natural penetra nos ambientes internos pelas aberturas, que também podem transmitir calor e som para o interior, tornando-se um elemento essencial no desempenho combinado de estes aspectos. Um bom projeto de iluminação natural inclui conceitos como: forma do edifício, cores, orientação e distribuição espacial. Estratégias que podem ser implementadas para incrementar a iluminação natural são: desenho correto de pátios e átrios, uso de prateleiras de luz, emprego de cores claras, correta distribuição e posicionamento das janelas e aproveitamento de iluminação zenital através do uso de mansardas, claraboias, *sheds* ou domos (LAMBERTS; DUTRA, 2014).

Com relação ao projeto de janelas, a penetração da luz natural aumenta com a altura da janela e com a presença de prateleiras de luz, sendo que janelas horizontais e espalhadas distribuem a luz mais uniformemente. A área percentual de janela em relação à área do piso raramente deve exceder 20%, devido à incidência de calor no verão e às perdas no inverno. A melhor orientação para iluminação natural é a norte, devido à incidência mais frequente da luz solar direta e facilidade de sombreamento; seguida pela sul, devido à constância da luz e menores problemas de ofuscamento. As orientações leste e oeste são as piores, já que o projeto de proteções solares deve considerar ângulos muito baixos de altura solar (LAMBERTS; DUTRA, 2014).

Um edifício iluminado com luz natural pode economizar uma quantidade significativa de eletricidade se a iluminação artificial permanecer desligada quando há luz natural suficiente. Para tanto, utilizam-se sistemas de controle automáticos como são: sensores fotoelétricos, sensores de presença e *dimmers* (LAMBERTS; DUTRA, 2014).

2.3.1.2 Ventilação natural

A ventilação natural é eficaz entre temperaturas de 20 a 32 °C, pois a partir daí os ganhos térmicos por convecção funcionariam como aquecimento do ambiente. Este método é indissociável da orientação e da implantação do edifício no terreno. O vento predominante do verão deve ser explorado para resfriar os ambientes, já o vento

predominante do inverno dever ser evitado. Elementos como vegetação e superfícies edificadas influenciam no ângulo de incidência e na intensidade com a qual o vento atinge a edificação (LAMBERTS; DUTRA, 2014).

A ventilação cruzada é uma das técnicas mais eficazes de ventilação, basicamente consiste de duas aberturas em paredes diferentes e certo conhecimento da orientação dos ventos desejáveis no período quente. Outras técnicas são o uso de lanternins, peitoris ou mansardas para retirar o calor acumulado nas coberturas mediante ventilação natural; captadores de vento para conduzir a ventilação natural aos ambientes; ou torres de ventilação baseadas no princípio de termossifão. Com relação ao direcionamento do vento, este pode ser controlado através de elementos externos como muros, placas, platibandas e beirais, os quais podem direcionar o fluxo de ar para o interior, além de servirem como proteção solar. Outra estratégia que pode ser empregada para reduzir a temperatura à noite é a ventilação noturna, geralmente usufruída por edifícios de alta inércia térmica (LAMBERTS; DUTRA, 2014).

2.3.1.3 Eliminação de pontes térmicas e hermeticidade

Uma ponte térmica é definida como uma área termicamente fraca da envolvente do edifício, através da qual o calor penetra causando perdas de energia. Quando existem diferenças térmicas entre áreas do envelope de um edifício, o calor tende a passar pelos elementos com maior condutividade térmica, resultando em pontes térmicas. Os pontos críticos para este fenômeno acontecer são as bordas, cantos e conexões. Em edificações de alto desempenho, as pontes térmicas devem ser minimizadas, sugerindo-se atingir coeficientes inferiores que $0,01 \text{ W/mK}$ (OMRANY; MARSONO, 2016).

A hermeticidade está associada à minimização das infiltrações de ar quente ou frio indesejados, diminuindo assim a carga térmica. Edificações passivas devem ser extremamente herméticas, o qual pode ser alcançado através do emprego de camadas contínuas de materiais herméticos ao redor do envelope como membranas, fitas, colas, juntas, etc. (OMRANY; MARSONO, 2016).

2.3.1.4 Parâmetros do envelope

Através da envoltória é que ocorrem as trocas térmicas e de massa entre o ambiente interno e externo, desta forma, o consumo energético e o conforto térmico de uma edificação estão diretamente ligados às características do envelope. Uma vez que o fechamento desempenha um papel de grande influência nas condições ambientais internas, torna-se necessário a análise da suas características, entre elas (COSTA; SOUZA, 2015):

- Isolamento térmico

O isolamento térmico é o material ou a combinação de materiais usados na estrutura do edifício para reduzir a transferência de calor para dentro ou para fora do ambiente. A aplicação adequada do isolamento térmico na envolvente da edificação pode resultar na redução do consumo de energia, bem como na diminuição do impacto ambiental (OMRANY; MARSONO, 2016).

Com relação aos isolamentos térmicos utilizados em EBCMs, existem diversos tipos que se adaptam a estruturas metálicas como, espuma expansiva, mantas de lã de rocha ou lã de vidro, painéis rígidos de lã mineral, poliestireno expandido (EPS) ou extrudado (XPS), entre outros. O isolamento por espuma expansiva é caracterizado pela velocidade, flexibilidade e alto valor R; porém possui alto custo. Painéis de isolamento rígidos são rápidos de colocar, mas implicam a instalação de estruturas com pinos. As mantas são mais baratas que a espuma e painéis, no entanto precisam mais cuidado no manuseio (BERBESZ; SZEFER, 2018; ELRAYIES, 2017). Uma tendência atual da construção em CMs é o uso do sistema *steel frame* com fechamento em chapa de OSB ou gesso acartonado e isolamento de EPS, lã de pet, lã de vidro ou lã de rocha (GUEDES; BUORO, 2015).

- Massas de inércia térmica

Uma edificação de elevada inércia térmica proporcionará uma diminuição das amplitudes térmicas internas e um atraso térmico no fluxo de calor devido a sua alta capacidade de armazenar calor, fazendo com que o pico de temperatura interna apresente uma defasagem e um amortecimento em relação ao externo. Componentes de alta inércia térmica absorvem calor durante o verão, mantendo a edificação confortável; e no inverno, podem armazenar o calor para liberá-lo à noite. Esta característica é particularmente benéfica em regiões de clima seco onde há uma

grande diferença entre as temperaturas diurnas e noturnas externas (acima de 7°C) (MMA, 2019a).

A inércia térmica total da edificação depende das características do envelope, o qual deve ser composto por materiais geralmente densos e de elevada capacidade térmica. O concreto e a alvenaria cerâmica são os materiais que apresentam capacidade térmica elevada. (MMA, 2019a)

- Fechamentos transparentes

As principais trocas térmicas de uma edificação acontecem nesta parte das edificações. A principal dificuldade em um fechamento transparente é controlar as parcelas de radiação transmitida diretamente e absorvida e reemitida para o interior. As principais variáveis que podem alterar o aporte de calor pelas aberturas são (LAMBERTS; DUTRA, 2014):

Orientação e tamanho

A orientação da fachada pode expor aberturas de dimensões idênticas a quantidades distintas de calor. Para ter uma ideia sobre a insolação de uma fachada é utilizada a carta solar, junto a sua altura e azimute. Com relação ao tamanho, quanto maior a abertura, maior quantidade de calor que pode entrar ou sair do ambiente.

Tipo de vidro

A radiação solar incidente em um fechamento transparente pode ser absorvida, refletida ou transmitida para o interior, dependendo da absorvidade (α), refletividade (ρ) e transmissividade (τ) do vidro. Conforme as características óticas, existem diversos tipos de vidro, alguns exemplos são: vidro simples, películas e vidros absorventes, películas e vidros reflexivos, vidros espectralmente seletivos, especiais (cristal líquido, policrômicos, eletrocômicos e de partículas suspensas), aberturas com múltiplas camadas de vidro (duplos, triplos), etc.

Uso de proteções solares externas e internas

As proteções solares externas podem ser horizontais ou verticais. Nas proteções horizontais, o sol é sombreado quando sua altura solar está entre o zênite e o ângulo α , indicado na Figura 4. As proteções verticais sombreiam o sol com relação ao seu ângulo de azimute. Normalmente são placas instaladas nas bordas laterais da abertura, que sombreiam o sol quando se encontra entre a linha da fachada e o ângulo β da Figura 4.

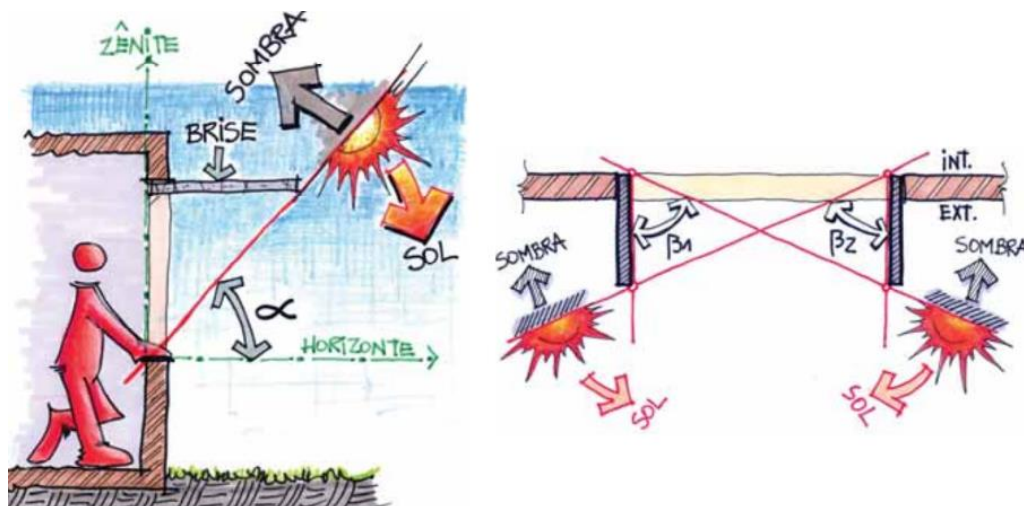


Figura 4: Ângulos das proteções solares horizontais (esq.) e verticais (dir.).
Fonte: Lamberts e Dutra (2014).

Os elementos de sombreamento interno de janelas incluem persianas móveis verticais e de enrolar, venezianas e cortinas. Estes mecanismos de sombreamento apresentam a desvantagem de não impedir a penetração da radiação solar direta. A radiação é obstruída pela cortina após ter passado pelo vidro, sendo refletida na forma de calor (onda longa) que permanece preso no interior da edificação, uma vez que o vidro é opaco à onda longa. Em janelas de vidro com veneziana interna a redução do fator de ganho solar é aproximadamente 17 % (MMA, 2019b).

- Cor das superfícies externas

O uso de cores apropriadas nas superfícies externas dos edifícios pode influenciar a taxa de recebimento ou de bloqueio da radiação solar. Analisando a absorvidade (α), pode-se dizer se os materiais de construção são seletivos à radiação de onda curta e a principal determinante desta característica é sua cor superficial. Um material escuro absorverá a maior parte da radiação incidente enquanto que um material claro absorverá bem pouco (LAMBERTS; DUTRA, 2014).

- Orientação da edificação

Para a maioria dos edifícios, uma forma comprida ao longo do eixo leste-oeste é a melhor prática de controle solar. Como regra geral, a orientação pode variar até 15° e continuar fornecendo um controle solar aceitável. A fachada sul recebe luz solar direta mínima e geralmente não requer controle solar direto. Salas com maiores ganhos internos podem ser colocadas no lado sul do edifício, onde o resfriamento passivo é mais fácil (KRISTIANSEN; MA; WANG, 2019).

- Forma da edificação

Formas compactas de construção têm uma área de superfície exposta relativamente pequena para uma determinada área de piso, reduzindo assim a influência do ambiente externo. Por sua vez, construções altas podem incrementar as necessidades energéticas por causa da maior exposição (CIBSE, 2012).

2.3.2. Medidas de eficiência ativas

As opções para geração de energia no local são geralmente fotovoltaica (FV) e eólica (KRISTIANSEN; MA; WANG, 2019). Até 2040, espera-se que a FV e o vento recebam 75% do novo apoio para a geração de eletricidade renovável (IEA, 2018). Solar FV, solar térmica e bombas de calor são quase sempre incluídos nos projetos de NZEBs. Para NZEBs *off-grid* a opção mais viável atualmente é o uso de baterias integradas com FV (KRISTIANSEN; MA; WANG, 2019).

2.3.2.1 Fotovoltaica

A geração fotovoltaica (FV) aumentou de 0,1% em 2000 para 2% hoje, além disso estima-se que em 2040 sua participação global deverá atingir 10% (IEA, 2018). O seu custo nivelado da eletricidade (*levelized cost of electricity* - LCOE) diminuiu em 65% nos últimos cinco anos. Adicionalmente, há uma boa compatibilidade entre a geração FV e a demanda de resfriamento (KRISTIANSEN; MA; WANG, 2019).

Com relação ao armazenamento, edificações *off-grid* são tipicamente localizadas em áreas rurais, o qual exige sistemas altamente confiáveis e com alta densidade específica de energia. Uma das alternativas mais atraentes é o uso de baterias de íons de lítio, por causa de possuírem múltiplas vantagens sobre a clássica opção de chumbo-ácido, entre elas capacidade de descarga maior do que 90%. Entre 2007 e 2014 o preço de este tipo de bateria caiu a uma taxa de 14% ao ano, e projeta-se que o mesmo cairá para metade até 2030. Este panorama de diminuição de preços de baterias e sistemas FV esta originando um momento oportuno para o desenvolvimento de NZEBs *off-grid* e edifícios transportáveis (KRISTIANSEN; MA; WANG, 2019).

Com referência ao potencial solar brasileiro, a média anual de irradiação global apresenta boa uniformidade, com médias anuais relativamente altas em todo

país. Os valores de irradiação solar global incidente em qualquer região do território encontram-se na faixa dos 1500-2500 kWh/m², sendo superiores aos da maioria dos países da UE, como Alemanha (900-1250 kWh/m²), França (900-1650 kWh/m²) e Espanha (1200-1850 kWh/m²), onde projetos para aproveitamento de recursos solares são amplamente disseminados (PEREIRA *et al.*, 2006).

2.3.2.2 Aquecimento solar de água

Os sistemas solares térmicos possuem a terceira maior parcela da capacidade instalada mundial de energias renováveis. Sua capacidade em operação cresceu de 62 GW_{th} em 2000 para 480 GW_{th} em 2018; ficando atrás da energia eólica com 590 GW_{el} e a FV com 502 GW_{el}. Os coletores de tubos evacuados são a tecnologia predominante com uma participação global de 71%, seguidos pelos coletores de placas planas com 22,6%, coletores de placa aberta com 6,1% e coletores de ar com 0,3%. Os coletores de placa plana têm baixas temperaturas de trabalho, 30-80 °C, mas são econômicos e têm uma longa vida útil. Para climas mais frios ou temperaturas de saída mais altas, são utilizados os coletores de tubos evacuado, com temperaturas de saída entre 50-200°C (KRISTIANSEN; MA; WANG, 2019). Globalmente, mais de três quartos de todos os sistemas solares térmicos instalados são sistemas de termossifão, e o restante são sistemas bombeados (WEISS; SPORK-DUR, 2019).

No Brasil, o aquecimento de água corresponde à 37% do consumo total de energia e 24% do consumo de eletricidade em edificações (ELETROBRAS; PROCEL, 2005; IEA, 2013). A capacidade total instalada de coletores solares térmicos é 10.411 MW_{th}, sendo que 63,2% das instalações utilizam coletores de placa plana, 36,1% placa aberta e 0,7% tubos evacuados (WEISS; SPORK-DUR, 2019).

2.3.2.3 Energia eólica

A velocidade do vento nos locais costuma ser geralmente baixa, para que a energia eólica seja considerada tecnicamente aproveitável, é necessário que sua densidade seja maior ou igual a 500 W/m², a uma altura de 50 metros; o que requer uma velocidade mínima do vento de 7 a 8 m/s. No Brasil, as regiões com maior

potencial eólico medido são o Nordeste, principalmente no litoral; Sudeste, particularmente no Vale do Jequitinhonha; e Sul (ANEEL, 2008).

Geralmente a eólica é considerada uma boa opção para abastecer grupos de edificações, mas não para habitações individuais. Um dos benefícios de este tipo de energia é que a disponibilidade solar e eólica tendem a ter características complementares (ou seja, quando a disponibilidade solar é baixa, a disponibilidade de vento tende a ser alta, e vice-versa), o que sugere que a energia solar e a energia eólica podem compensar-se ao longo do ano (KRISTIANSEN; MA; WANG, 2019).

2.3.3. Conforto térmico

Os NZEBs são caracterizados por uma redução notável da energia necessária para o condicionamento do espaço, mas tal redução de energia não deve comprometer a qualidade de seu ambiente térmico interno. A especificação dos objetivos de conforto térmico que um edifício deve atingir é um pré-requisito para o seu projeto (ATHIENITIS; O'BRIEN, 2015). O conforto térmico é definido pela ASHRAE 55 como um estado de espírito que reflete a satisfação com o ambiente térmico que envolve a pessoa.

Se o balanço de todas as trocas de calor a que está submetido o corpo for nulo e a temperatura da pele e suor estiverem dentro de certos limites, pode-se dizer que o homem sente conforto térmico. As variáveis ambientais que influenciam no conforto térmico e podem ser medidas são: temperatura do ar, temperatura radiante, umidade relativa e velocidade do ar. Além destas, existem as pessoais, como atividade física e vestimenta (LAMBERTS; DUTRA, 2014). Vários modelos têm sido propostos na literatura para quantificar o conforto térmico. Os mesmos podem ser agrupados em duas famílias principais: (i) modelos de balanço de calor e (ii) modelos adaptativos (ATHIENITIS; O'BRIEN, 2015). A continuação uma breve descrição de ambos os modelos é relatada.

2.3.3.1 Modelo de Fanger - PMV

O modelo de conforto baseado no equilíbrio de calor foi desenvolvido por Fanger, quem derivou uma equação experimental para o cálculo do Voto Médio Predito (PMV – *Predicted mean vote*). O PMV consiste em um valor numérico que

traduz a sensibilidade humana ao frio e ao calor, sendo seu valor igual a zero para conforto térmico, negativo para o frio e positivo para o calor. Posteriormente, foi implementado o conceito de Porcentagem de Pessoas Insatisfeitas (*Predicted Percentage of Dissatisfied* - PPD). Na norma ASHRAE 55 são definidas duas regiões de conforto, 80 e 90% de aceitabilidade, os valores de PMV e PDD recomendados para cada região de conforto encontram-se na Tabela 3 (LAMBERTS; DUTRA, 2014).

As principais deficiências do modelo Fanger são: (i) os indivíduos não são considerados ativos, quer dizer, não adaptam sua atividade, roupas e oportunidades de personalização do prédio (operação de janelas, portas e elementos de sombreamento, ou modificação de *set-points*, etc.); (ii) não leva em consideração as diferenças climáticas e os tipos de construções; (iii) não leva em conta aspectos psicológicos e culturais (ATHIENITIS; O'BRIEN, 2015).

2.3.3.2 Modelo adaptativo

Em edifícios não climatizados em climas quentes, os ocupantes podem sentir o calor como sendo menos severo do que o PMV prevê. Além disso, se ocorrer uma mudança que produza desconforto, as pessoas reagem de maneira a restaurar o conforto através da interação com o ambiente. A base teórica dos modelos de conforto adaptativo é o conceito de adaptação, que pode ser interpretado como a diminuição gradual da resposta do organismo à estimulação ambiental repetida. A equação canônica dos modelos adaptativos é definida como, $T_{conforto} = a \cdot f(T_{ext}) + b$; muitas abordagens propondo diferentes valores para os termos desta equação encontram-se disponíveis na literatura (ATHIENITIS; O'BRIEN, 2015). Os intervalos da temperatura operacional de conforto aceitáveis para espaços naturalmente condicionados definidos pela ASHRAE 55 de acordo aos modelos adaptativos encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3: Classes de aceitabilidade da ASHRAE 55

Classe	Escopo	PPD (%)	Fanger	Adaptativo ΔT_{op} (°C)
90%	Alto padrão requerido	≤ 10	$-0,5 \leq PMV \leq +0,5$	$\pm 2,5$
80%	Aplicações típicas	≤ 20	$-0,85 \leq PMV \leq +0,85$	$\pm 3,5$

2.3.4. Avaliação econômica

NZEBs tendem a ser mais custosos que edifícios tradicionais, logo é importante realizar uma análise econômica no estágio inicial do projeto de maneira a atingir as metas de energia com custos razoáveis (KRISTIANSEN; MA; WANG, 2019)

A análise do custo do ciclo de vida (*Life-cycle cost* - LCC) é um método econômico de avaliação de projetos no qual todos os custos decorrentes de possuir, operar, manter e descartar são considerados. Este método é particularmente adequado para a avaliação de alternativas de projeto que satisfazem um nível necessário de desempenho em uma edificação, mas que podem ter custos de investimento, operação, manutenção ou reparo diferentes. O LCC fornece uma avaliação significativamente melhor da relação custo-benefício a longo prazo do que métodos econômicos alternativos que se concentram apenas no primeiro custo ou no custo relacionado à operação no curto prazo (FULLER; PETERSEN, 1996).

Projetos de conservação de energia são excelentes exemplos para a aplicação do LCC. Há quase sempre diversas alternativas de design para qualquer sistema de construção, por exemplo, isolamentos térmicos com ampla faixa de valores de R, janelas disponíveis em uma ampla gama de valores de condutância térmica, variedade de filmes de controle solar, etc. Somente uma alternativa pode ser usada em uma determinada aplicação, sendo assim o LCC pode ser utilizado para identificar a alternativa mais econômica que geralmente é aquela com o menor custo do ciclo de vida (FULLER; PETERSEN, 1996).

2.4. NORMAS DE DESEMPENHO

Existem duas normas brasileiras que auxiliam na avaliação do desempenho energético e conforto que uma edificação proporciona ao usuário, estas são, a NBR 15575 para desempenho geral de edificações habitacionais e a NBR 15220 específica do desempenho térmico de edificações. Na sequência são apresentadas as partes de ambas normas significativas no desenvolvimento da presente dissertação.

2.4.1. NBR 15220-3

Cada estratégia de desenho passiva é válida apenas para algumas condições climáticas, desde modo, a terceira parte da NBR 15220 propõe uma a divisão do território brasileiro em oito zonas relativamente homogêneas quanto ao clima e, para cada uma destas zonas, formula um conjunto de recomendações técnico-construtivas que otimizam o desempenho térmico das edificações, através de sua melhor adequação climática (ABNT, 2005). Esta divisão do território em zonas bioclimáticas é apresentada na Figura 5.



Figura 5: Zoneamento bioclimático brasileiro.
Fonte: Lamberts e Dutra (2014).

2.4.2. NBR 15575

A NBR 15.575 entrou em vigor em julho de 2013, e é a primeira norma a tratar da qualidade dos produtos da construção civil, bem como sua utilização pelos consumidores, se tornando um dos principais indicadores de desempenho de uma edificação. A norma aplica para edifícios habitacionais de até cinco pavimentos, independente dos materiais e sistemas construtivos empregados. Encontra-se dividida nas seguintes partes:

1. Requisitos gerais da obra;
2. Requisitos para os sistemas estruturais;
3. Requisitos para os sistemas de pisos;
4. Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas;
5. Requisitos para sistemas de cobertura;
6. Requisitos para os sistemas hidrossanitários.

A fim de satisfazer às demandas dos usuários em termos de segurança, habitualidade e sustentabilidade, para cada uma das partes da norma são instituídos requisitos e critérios distribuídos segundo o desempenho estrutural; segurança contra incêndio; segurança no uso e na operação; estanqueidade; desempenho térmico, acústico e lumínico; durabilidade e manutenibilidade; saúde, higiene e qualidade do ar; funcionalidade e acessibilidade; conforto tátil e antropodinâmico; e adequação ambiental (ABNT, 2013a). Quanto à classificação, a mesma apresenta três níveis de desempenho: mínimo (M), intermediário (I) e superior (S). Para efetivação desta pesquisa, aplicam-se os requisitos de desempenho térmico, descritos na sequência.

2.4.2.1 Desempenho térmico

A exigência em relação ao desempenho térmico é dada considerando-se a localização da edificação e sua respectiva zona bioclimática (ZB), definida segundo a NBR 15220-3. Para avaliação do desempenho térmico há três procedimentos possíveis de se utilizar:

1. Simplificado: verificação do atendimento aos requisitos e critérios para fachadas e coberturas estabelecidos nas NBR 15.575-4 e NBR 15.575-5;
2. Simulação: verificação do atendimento aos requisitos e critérios na NBR 15.571-1, por meio de simulação computacional do desempenho térmico do edifício;
3. Medição: verificação do atendimento aos requisitos e critérios estabelecidos na NBR 15.575-1, por meio da realização de medições em edificações ou protótipos construídos.

No presente trabalho empregaram-se os procedimentos 1 e 2.

2.4.2.2 Procedimento 1: Simplificado

- Requisito – Adequação das paredes externas (ABNT, 2013b)

As paredes devem apresentar transmitância (U) e capacidade térmica (C_T) que proporcionem um nível mínimo de desempenho de acordo com a ZB em que se insere a obra. Os valores máximos admissíveis para U e os valores mínimos admissíveis para C_T são apresentados na Tabela 4 e Tabela 5, respectivamente. O cálculo de esses parâmetros deve seguir os procedimentos estabelecidos na NBR 15.220-2.

Tabela 4: Transmitância térmica de paredes externas, U ($W/m^2.K$)

Zonas 1 e 2	Zonas 3, 4, 5, 6, 7 e 8	
$U \leq 2,5$	$\alpha^a \leq 0,6$	$\alpha^a > 0,6$
	$U \leq 3,7$	$U \leq 2,5$

^a α é a absorptância à radiação solar da superfície externa da parede

Tabela 5: Capacidade térmica de paredes externas, C_T ($kJ/m^2.K$)

Zona 8	Zonas 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7
Sem exigência	≥ 130

- Requisito – Aberturas para ventilação (ABNT, 2013b)

Este requisito aplica aos ambientes de longa permanência: salas, cozinhas e dormitórios. Quando não houver legislação específica no local de implantação da obra, a norma estabelece os valores mínimos aceitos para a dimensão das aberturas para ventilação, conforme Tabela 6.

Tabela 6: Área mínima de ventilação (A) em porcentagem da área do piso

Zona 1 a 7	Zona 8 – região nordeste e sudeste	Zona 8 – região norte
Aberturas médias	Aberturas grandes	Aberturas grandes
$^a A \geq 7\%$	$A \geq 8\%$	$A \geq 12\%$

^a $A = 100 \cdot (A_A/A_P)$, onde A_A é a área efetiva de abertura de ventilação do ambiente e A_P é a área de piso do ambiente.

- Requisito – Isolação térmica da cobertura (ABNT, 2013c)

A cobertura deve apresentar U e absorvância à radiação solar (α) que proporcionem um nível mínimo de desempenho térmico apropriado para cada ZB. Os valores máximos admissíveis para o U da cobertura, considerando fluxo térmico descendente são apresentados na Tabela 7. O cálculo deve seguir o procedimento estipulado na NBR 15.220-2.

Tabela 7: Transmitância térmica da cobertura, U ($\text{W/m}^2\text{K}$)

Zonas 1 e 2	Zonas 3 a 6		Zonas 7 e 8	
	$\alpha \leq 0,6$	$\alpha > 0,6$	$\alpha \leq 0,4$	$\alpha > 0,4$
$U \leq 2,30$	$U \leq 2,3$	$U \leq 1,5$	$U \leq 2,3 \text{ FV}^a$	$U \leq 1,5 \text{ FV}^a$

^a FV é o fator de ventilação, estabelecido na NBR 15.220-2

2.4.2.3 Procedimento 2: Simulação

Para as simulações recomenda-se utilizar o programa EnergyPlus, e os dados climáticos correspondentes aos dias típicos de projeto de verão e de inverno indicados no anexo da norma. Na falta de dados para a cidade onde se encontra a habitação, sugere-se utilizar os dados climáticos de uma cidade próxima com características climáticas semelhantes e na mesma ZB. Com relação à geometria do modelo de simulação, cada ambiente deve ser considerado como uma zona térmica.

- Requisito – Exigências de desempenho no verão (ABNT, 2013a)

Para obter o nível de aceitação mínimo (M), no dia típico de verão os valores máximos diários da temperatura do ar interior ($T_{i,\text{max}}$) de recintos de permanência prolongada, sem presença de fontes internas de calor (ocupantes, lâmpadas e equipamentos em geral), devem ser sempre menores ou iguais ao valor máximo diário da temperatura do ar exterior ($T_{e,\text{max}}$), conforme Tabela 8.

Tabela 8: Critério de avaliação de desempenho térmico no verão

Zonas 1 a 7	Zona 8
$T_{i,\text{max}} \leq T_{e,\text{max}}$	$T_{i,\text{max}} \leq T_{e,\text{max}}$

- Requisito – Exigências de desempenho no inverno (ABNT, 2013a)

Para obter o nível de aceitação mínimo (M), no dia típico de inverno os valores mínimos diários da temperatura do ar interior ($T_{i,min}$) de recintos de permanência prolongada, como salas e dormitórios, devem ser sempre maiores ou iguais à temperatura mínima externa acrescida de 3 °C, conforme Tabela 9.

Tabela 9: Critério de avaliação de desempenho térmico no inverno

Zonas 1 a 5	Zonas 6, 7 e 8
$T_{i,min} \geq (T_{e,min} + 3 \text{ °C})$	-

Todos os recintos da unidade habitacional devem ser simulados considerando as trocas térmicas entre os seus ambientes. Caso a orientação da edificação não esteja definida, deve ser posicionada de tal forma que a unidade a ser avaliada tenha a condição mais crítica do ponto de vista térmico. Como condição crítica do ponto de vista térmico recomenda-se:

1. Verão: janela do dormitório ou da sala voltada para oeste e a outra parede exposta voltada para o norte. Caso não seja possível, o ambiente deve ter pelo menos uma janela voltada para oeste;
2. Inverno: janela do dormitório ou da sala de estar voltada para sul e a outra parede exposta voltada para leste. Caso não seja possível, o ambiente deve ter pelo menos uma janela voltada para sul;
3. Obstruções no entorno: considerar que as paredes expostas e janelas estão desobstruídas;
4. Obstrução por elementos construtivos (p. ex.: para-sóis, marquises, beirais) previstos na edificação devem ser considerados;
5. Taxa de ventilação: uma renovação por hora (1 ren/h);
6. Absortância da cobertura: adotar o valor correspondente ao material exposto declarado para o telhado;
7. Absortância das paredes: assumir o valor correspondente à cor do projeto. Caso a mesma não esteja definida, simular para três alternativas de cor: clara, $\alpha = 0,3$; média, $\alpha = 0,5$; escura, $\alpha = 0,7$.

A unidade habitacional que não atender aos critérios estabelecidos para verão deve ser simulada novamente considerando-se as seguintes alterações:

1. Ventilação: considerar uma taxa de 5 ren/h;
2. Sombreamento: inserção de proteção solar externa capaz de cortar no mínimo 50 % da radiação solar direta que entraria pela janela, com taxa de ventilação de 1 ren/h;
3. Ventilação e sombreamento: combinação das duas estratégias, ou seja, dispositivos de sombreamento e taxa de renovação igual a 5 ren/h.

2.5. MODELAGEM, SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE ENERGIA NAS EDIFICAÇÕES

Na ciência da construção, os projetistas geralmente usam programas dinâmicos de simulação térmica para analisar o comportamento térmico e energético das edificações a fim de atingir alvos específicos, por exemplo, redução do consumo de energia, impactos ambientais ou melhoria do ambiente térmico interno, etc. Uma abordagem conhecida como "simulação paramétrica" pode ser usada para melhorar o desempenho da construção. Nesta abordagem, a entrada de cada variável é variada para ver o efeito nos objetivos do projeto, enquanto todas as outras variáveis são mantidas constantes. Este método costuma consumir muito tempo, ao mesmo tempo em que resulta em melhorias parciais, devido às interações complexas e não lineares das variáveis de entrada (NGUYEN; REITER; RIGO, 2014).

Para obter uma solução ideal, consumindo menos tempo e trabalho, o modelo computacional de edificação é "resolvido" por métodos iterativos, que constroem sequências infinitas de aproximações progressivamente melhores a uma "solução", isto é, um ponto no espaço de busca que satisfaz uma condição de otimalidade. Devido à sua natureza iterativa, esses métodos são geralmente automatizados através de programação de computadores e recebem o nome de otimização numérica ou otimização baseada em simulação (OBS). Nos últimos tempos, o número de estudos nesta área têm aumentado rapidamente, demonstrando um grande interesse da comunidade acadêmica pela OBS (NGUYEN; REITER; RIGO, 2014).

Em matemática, otimização é a disciplina envolvida em encontrar a entrada de uma função que minimize ou maximize seu valor, o qual pode estar sujeito a

restrições. Uma função objetivo é definida como uma função matemática sujeita a otimização. Se o problema visa minimizar uma única função objetivo, é chamado de problema de otimização de objetivo único; caso contrário, é chamado de otimização multi-objetivo. No caso de funções de objetivo único, a solução ótima do problema é seu mínimo ou máximo global, dependendo da finalidade. Por outro lado, em problemas de otimização multi-objetivo, uma variante de construção específica geralmente não é capaz de minimizar ou maximizar simultaneamente cada função objetivo. Em vez disso, ao procurar por soluções, uma melhoria adicional em direção ao valor mínimo de uma das funções objetivo faz com que as outras se desviem dos mínimos. Portanto, o objetivo de um problema de otimização multi-objetivo consiste em encontrar tais variantes e em quantificar o balanço na satisfação das funções objetivas individuais (ATHIENITIS; O'BRIEN, 2015).

Na Tabela 10 encontra-se uma visão geral das variantes, funções objetivo e restrições que tem sido aplicadas nos trabalhos de OBS.

Tabela 10: Resumo dos parâmetros envolvidos na OBS.
Fonte: Adaptado de Harkouss, Fardoun e Henry (2018)

Variáveis de desenho
Transmitância térmica: paredes, teto, piso, molduras e vidros. Absortância térmica, solar e visível das paredes. Emissividade das paredes. WWR (<i>window-to-wall ratio</i>). Número de janelas. Fator solar dos vidros. Transmitância solar e visível dos vidros. Porcentagem de abertura das janelas (ventilação natural). Inclinação e profundidade das proteções solares. Tipo de proteção solar. Sistemas de sombreamento externos e internos. Estratégia de controle de dispositivos de sombreamento. Forma da construção. Nível de compactação. Altura do teto. Orientação da edificação. Área da casa. Estanqueidade / taxa de infiltração. Coeficiente de convecção.
Funções objetivo
<u>Econômicas</u> : Minimizar – LCC, investimento total, custo de operação. Maximizar - valor presente líquido (VPL).
<u>Energia</u> : Minimizar – Consumo em eletricidade, iluminação, resfriamento / aquecimento.
<u>Meio Ambiente</u> : Minimizar – Impacto ambiental do ciclo de vida, emissões do ciclo de vida.
<u>Conforto</u> : Minimizar – PMV, desconforto térmico no verão/inverno, desconforto visual, índices sazonais de desconforto a longo prazo (<i>Long-term Percentage of Dissatisfied</i> – LPD, no verão e no inverno), <i>Predicted Percentage of Dissatisfied</i> (PPD).
Restrições
Cargas de aquecimento $\leq 15 \text{ kWh} / \text{m}^2$. Requisitos anuais de energia $5 \leq \text{MJ} / \text{m}^2$. Taxa de renovação de ar $\geq 0,6 \text{ ACH}$. Disponibilidade de área. Largura total da janela < largura do piso. A área das janelas deve garantir iluminação e ventilação naturais adequadas. Intervalos aceitáveis da transmitância térmica dos componentes do envelope. Restrição orçamentária. Restrições nas variáveis de desenho. Restrição orçamentária. Restrições em variáveis de design. Número máximo de horas de desconforto fixadas de 200 até 350 h. $\text{PMV} \leq 0,5 - 0,7$.
Algoritmos
<i>Generalized pattern search algorithm</i> (GPS), <i>particle swarm optimization</i> (PSO), <i>non-dominated sorting genetic algorithm</i> (NSGA-II), <i>genetic algorithm</i> (GA), <i>artificial neural network</i> (ANN), <i>generalized particle swarm optimization with Hook Jeeves algorithm</i> (GPSPSOCCHJ), <i>sequential research</i> (SS), <i>tabu search algorithm</i> (TSA), <i>Artificial bee colony</i> (ABC).

2.5.1. Fases dos estudos de OBS

O processo de otimização pode ser subdividido em diversas etapas menores, Athienitis e O'brien (2015) subdividiram o procedimento em 3 fases: pré-processamento, execução da otimização e pós-processamento. Um resumo das fases encontra-se na Tabela 11.

Tabela 11: Fases dos estudos de OBS aplicada a edificações.
Fonte: Adaptado de Athienitis e O'Brien (2015)

Fase	Tarefas
Pré-processamento	Formulação do problema de otimização: • Criar o modelo computacional da edificação; • Definir as funções objetivo e restrições; • Selecionar e definir as variáveis independentes de desenho e restrições; • Selecionar um algoritmo de otimização apropriado e suas configurações para o problema em questão; • Acoplar o algoritmo de otimização e o programa de simulação de edificações.
	(Opcional) Filtrar variáveis sem importância usando análise de sensibilidade para reduzir o espaço de busca e aumentar a eficiência da otimização.
	(Opcional) Criar um modelo simplificado do modelo de simulação para reduzir o custo computacional da otimização.
Execução da otimização	Monitorar a convergência; Controlar os critérios de terminação; Detectar erros ou falhas de simulação.
Pós-processamento	Interpretar os resultados da otimização; (Opcional) Verificar e comparar os resultados da otimização de modelos simplificados e “reais” para confiabilidade; (Opcional) Realizar análise de sensibilidade nos resultados Apresentação dos resultados.

2.5.2. Algoritmos de otimização aplicáveis na OBS

Os algoritmos de otimização podem ser classificados dentro das seguintes abordagens: (i) busca determinista, (ii) busca baseada em população e (iii) busca híbrida.

A busca determinista opera alterando o valor das variáveis através de pequenos incrementos ou decrementos. O algoritmo determinista mais comumente utilizado é o Hooke-Jeeves (HJ). A Figura 6 ilustra o padrão de busca do HJ usando uma função de teste bidimensional. A cruz com círculos redondos representa a grade de pesquisa. A grade de pesquisa tem o mesmo número de dimensões que de variáveis de otimização. Os pontos representam a direção selecionada da próxima

iteração. Como pode ser observado, na terceira iteração o ajuste não é melhorado, portanto o algoritmo reduz à metade o tamanho da grade de pesquisa e continua a partir da última melhoria conhecida. Os tamanhos dos passos diminuem novamente nas iterações 4, 5 e 6 até que o valor ótimo global é encontrado e a busca finaliza (ATHIENITIS; O'BRIEN, 2015).

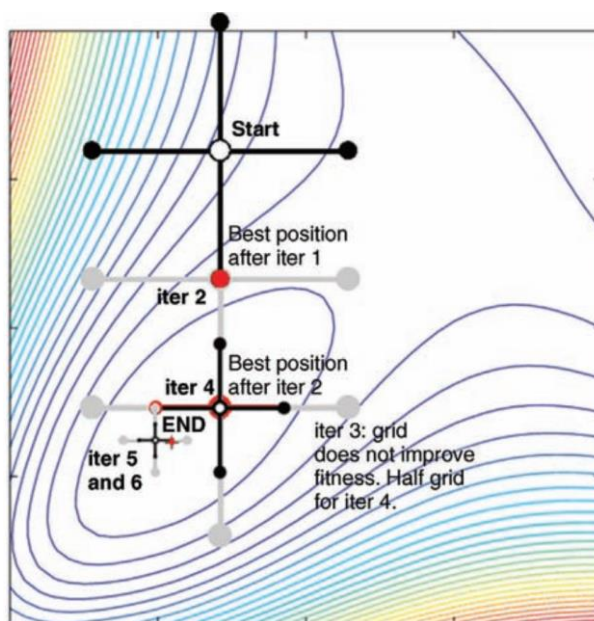


Figura 6: Exemplo de busca do algoritmo Hooke-Jeeves.
Fonte: Athienitis e O'Brien (2015).

Algoritmos baseados em população executam operações em populações de desenhos representativos de edifícios. Os algoritmos baseados em população mais comumente aplicados na OBS são o Genético (*Genetic Algorithm – GA*) e o *Particle Swarm Algorithm* (PSA). Os GAs tornaram-se populares devido à sua facilidade de implementação e capacidade comprovada de resolver problemas multimodais e multi-objetivos. A diferença do GA é que forma uma nova população de indivíduos em cada iteração, no PSA a população existente pode gravitar em direção a outros indivíduos ou partículas mais adequadas na população. As partículas são atualizadas usando as melhores partículas locais e globais no exame (ATHIENITIS; O'BRIEN, 2015).

Os pontos fortes dos algoritmos determinísticos e populacionais foram combinados em uma abordagem híbrida. Algoritmos baseados em população identificam regiões quase ótimas e pesquisas deterministas intensificam o processo de busca em torno das zonas quase ideais. Algoritmos híbridos mostram uma notável capacidade de lidar com problemas descontínuos, altamente restritos e/ou

multimodais, como frequentemente observados nos resultados de saída das simulações de edifícios (NGUYEN; REITER; RIGO, 2014).

2.5.3. Ferramentas de simulação e motores da otimização

Para otimizar o desempenho energético de um edifício, um algoritmo de otimização deve ser acoplado a um programa de simulação energética de edificações. Isto pode ser feito através de programação definida pelo usuário ou utilizando ferramentas de otimização desenvolvidas especificamente para este fim. Um resumo do funcionamento desta conexão é apresentado na Figura 7 (NGUYEN; REITER; RIGO, 2014).

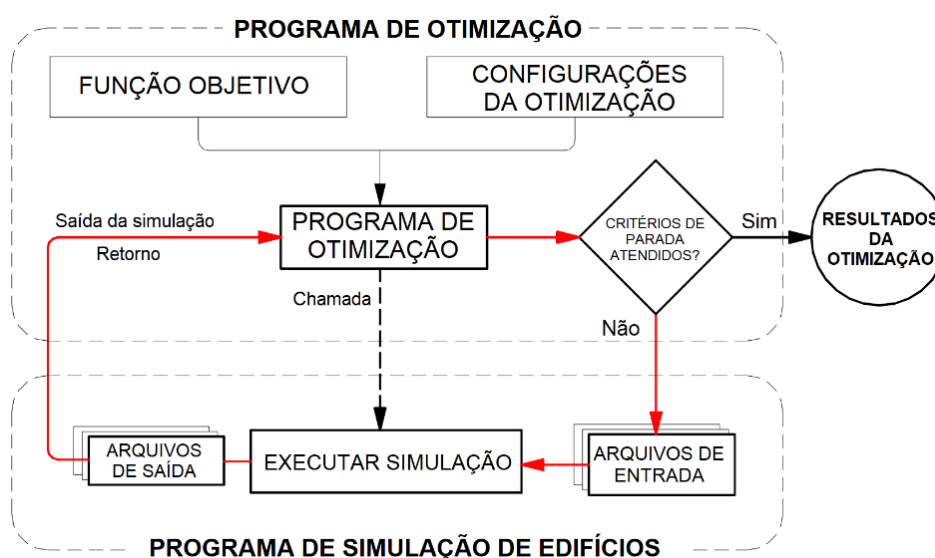


Figura 7: Laço de acoplamento aplicado na OBS de edificações.
Fonte: Adaptado de Nguyen, Reiter e Rigo (2014).

Na Figura 8 encontram-se algumas das ferramentas disponíveis para otimização de edifícios, observa-se que o MATLAB é a plataforma mais amplamente empregada, seguida pelo GenOpt e JEPlus. O MATLAB é um ambiente utilizado para resolver problemas numéricos de diferentes disciplinas usando sua própria linguagem de *script*; o mesmo tem sido acoplado a ferramentas de simulação energética de edifícios para otimizar o consumo de energia. O GenOpt foi desenvolvido pelo *Lawrence Berkeley National Laboratory* (Berkeley Lab), e é um programa de otimização que lê sua entrada de arquivos de texto e escreve suas saídas em arquivos de texto. Softwares de simulação como EnergyPlus e TRNSYS são utilizados para avaliar a função custo que o programa otimiza.

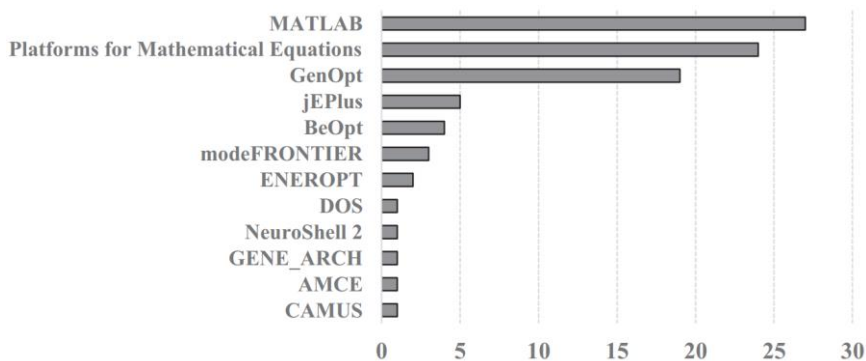


Figura 8: Frequência do uso de ferramentas de otimização de edificações.
Fonte: Kheiri (2018).

Entre os métodos para simulação do desempenho energético de edificações, a Figura 9 indica que o EnergyPlus, seguido pelo TRNSYS são as ferramentas utilizadas com maior frequência. O programa EnergyPlus é uma coleção de uma ampla série de módulos que trabalham juntos para calcular a energia necessária para aquecer e resfriar um prédio usando uma variedade de sistemas e fontes de energia. Isso é feito simulando a construção e os sistemas de energia enquanto são expostos a diferentes condições ambientais e operacionais. O núcleo da simulação é um modelo do edifício que é baseado nos princípios fundamentais do balanço de calor (DOE, 2018).

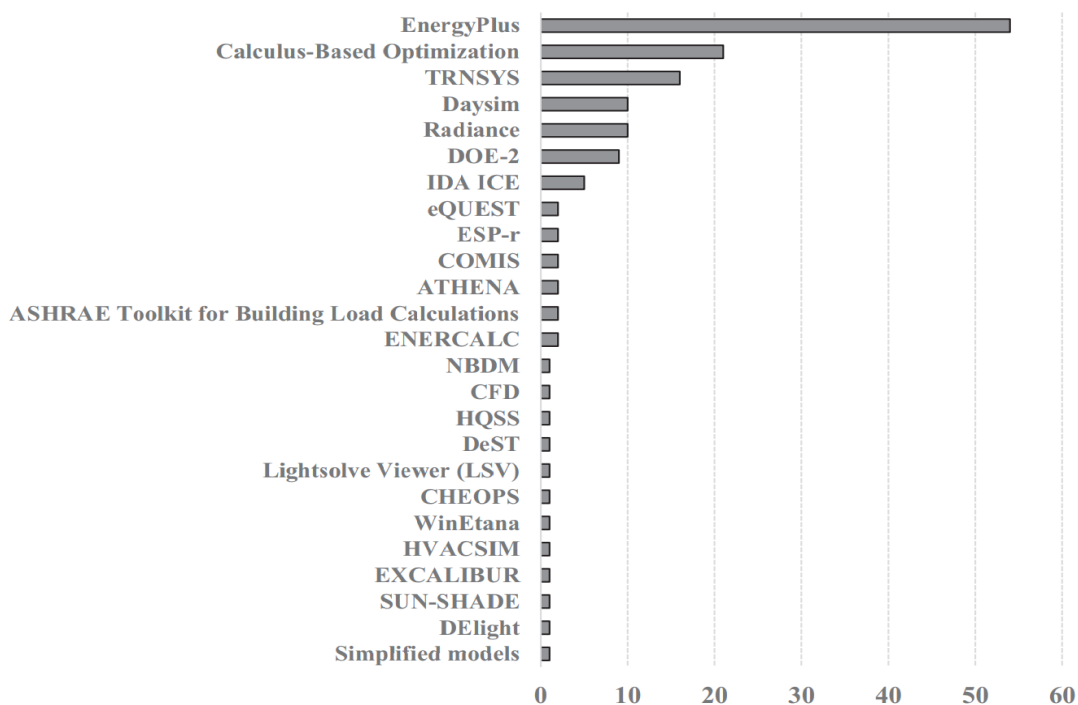


Figura 9: Frequência do uso de ferramentas de simulação de edificações.
Fonte: Kheiri (2018).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. DELINEAMENTO GERAL

A metodologia para chegar no projeto de edificação unifamiliar em contêineres energia zero, para cada zona bioclimática do território brasileiro, compreende as seguintes etapas:

1. Criação do modelo base de simulação (MB) de acordo com a norma NBR 15575, definição:
 - Geométrica: tamanho, forma, orientação, aberturas, etc.;
 - Composição: fechamentos externos, piso, superfícies envidraçadas;
 - Cargas internas: pessoas, iluminação, equipamentos elétricos, renovação de ar, etc.;
 - Sistema de ar condicionado.
2. Configuração da OBS, definição:
 - Funções objetivo;
 - Variáveis independentes;
 - Algoritmo;
 - Implementação do código no motor da otimização.
3. Execução da OBS e interpretação de resultados.
4. Verificação da ventilação natural:
 - Comprovação da porcentagem de abertura que precisa manter-se aberta para proporcionar a taxa de ventilação ótima.
5. Verificação do conforto térmico:
 - Avaliação das horas de desconforto térmico do modelo otimizado (MO) através dos modelos de conforto de Fanger e adaptativo (desligando o sistema de ar-condicionado).
 - Cálculo do consumo energético do MO quando o termostato funciona de acordo ao modelo de conforto adaptativo. Em outras palavras, o sistema de ar condicionado é ligado somente quando a temperatura interior estiver fora da classe de 80% de aceitabilidade apresentada previamente na Tabela 3.

Este terceiro modelo de simulação é denominado Modelo Optimizado com Conforto (MOC).

6. Cálculo do sistema de aquecimento de água solar (SAS) para suprir a demanda de água quente sanitária (AQS).
7. Cálculo dos sistemas fotovoltaicos *off-grid* e *on-grid* para suprir as necessidades energéticas do MOC e assim tornar à edificação NZE ao longo do ano.
8. Repetir o estudo a partir do passo 3 para cada uma das 8 zonas bioclimáticas.

A Figura 10 mostra o esquema da metodologia. Das etapas numeradas anteriormente, os passos 1 e 2 correspondem ao pré-processamento, onde cada ponto é definido pelo usuário. O passo 3 corresponde ao processo de otimização propriamente dito. Nesta fase, o algoritmo de otimização escolhido do motor de otimização, GenOpt, atribui valores ao conjunto de variáveis a serem otimizadas. Seguidamente, estes parâmetros são inseridos no motor de simulação, EnergyPlus, o qual realiza a simulação e calcula o valor da função objetivo. Este processo se repete de forma iterativa até que os critérios de parada são atendidos e a função objetivo minimizada, dando como saída o modelo de edificação otimizado (MO). Uma vez obtido o MO, a etapa de pós-processamento para tornar à edificação NZE corresponde aos passos 4 a 8, os quais são elaborados de forma externa pelo usuário. Nas seções que seguem, descrevem-se em maior detalhe os procedimentos necessários para executar cada uma das etapas numerados.

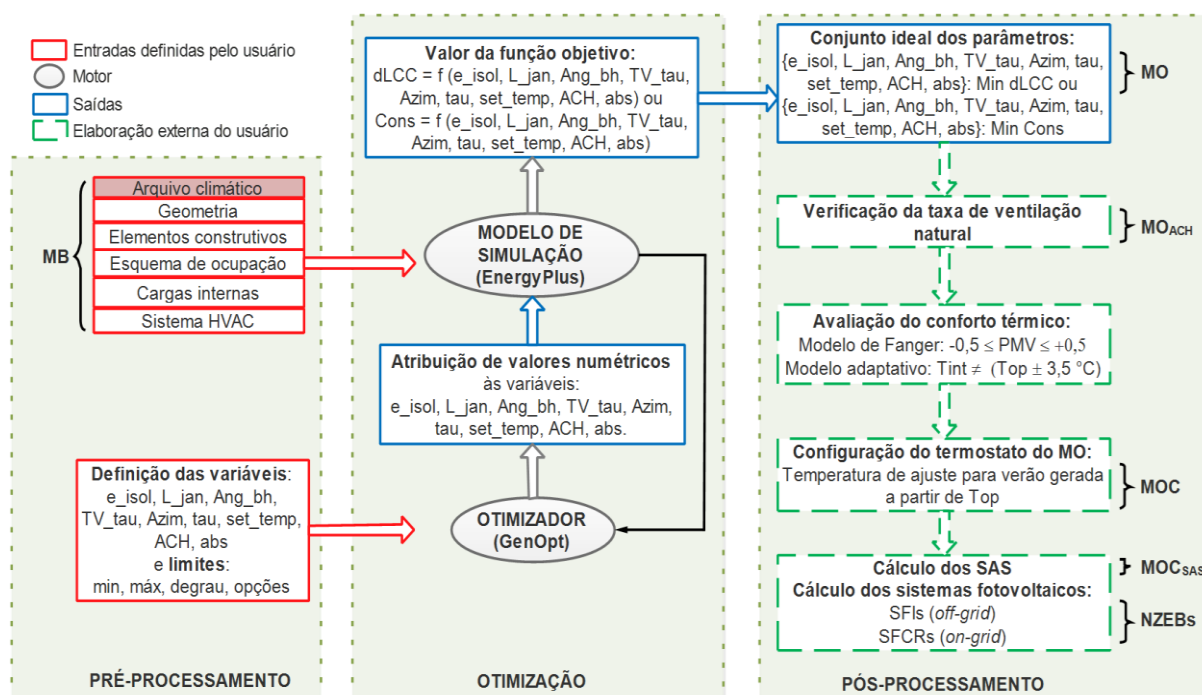


Figura 10: Esquema das etapas da metodologia.

3.2. DEFINIÇÃO GEOMÉTRICA DO MODELO BASE

3.2.1. Tipo de contêiner

De acordo com a ANTAC, 65,9% dos CMs movimentados no Brasil são do tipo 40' e 34,0% do tipo 20' (ANTAC, 2019). Por causa do tamanho 40' ser o mais abundante, o MB será construído utilizando esta variante. Adicionalmente, os contêineres serão do tipo HC, já que a altura extra proporcionada pelos mesmos possibilita respeitar o pé direito mínimo de 2,5 m requerido pela NBR 15.575-1 (ABNT, 2013a).

3.2.2. Distribuição dos ambientes internos

A partir dos dados do último censo demográfico do ano 2010, foi construída a Tabela 12, na qual observa-se que a maioria dos domicílios brasileiros possuem 5 cômodos e 2 dormitórios; portanto, esta foi a divisão dos ambientes adotada no MB.

Tabela 12: Quantidade de domicílios segundo o número de cômodos e dormitórios.
Fonte: Adaptado de IBGE (2010)

Núm. de cômodos	1	2	3	4	5	
Domicílios	350.370	1.772.102	4.767.486	8.808.941	14.891.462	-
%	0,61	3,09	8,32	15,37	25,98	-
Núm. de cômodos	6	7	8	9	10	TOTAL
Domicílios	10.686.527	6.576.113	4.103.600	2.134.689	3.229.264	57.320.554
%	18,64	11,47	7,16	3,72	5,63	
Núm. de dormitórios	1	2	3	4	5 ou mais	TOTAL
Domicílios	16.736.089	25.912.108	12.471.245	1.897.852	303.260	57.320.554
%	29,20	45,21	21,76	3,31	0,53	

3.2.3. Número de contêineres

O anexo G da norma NBR 15.575-1 estabelece os valores mínimos referentes à disponibilidade de espaço para cômodos de edifícios habitacionais, colocação e utilização dos móveis e equipamentos-padrão. Cada contêiner do tipo 40'HC possui uma área interna útil igual a 27,96 m² (ver seção 2.2.6). Para configurar uma habitação unifamiliar de 5 cômodos, sendo estes: sala de estar/jantar, cozinha, dormitório de casal, dormitório para duas pessoas e banheiro; respeitando os valores mínimos de espaço sugeridos na NBR 15.575-1, foi necessário utilizar dois contêineres do tipo 40'HC.

3.2.4. Forma do arranjo

A quantidade de radiação solar que incide em cada superfície externa de uma edificação é variável segundo a orientação e a época do ano. Consequentemente, o mesmo volume do espaço interior pode ter formas diversas e apresentar comportamentos térmicos e visuais distintos (LAMBERTS; DUTRA, 2014). Desde que a forma da edificação influencia no comportamento térmico, para definir o arranjo do MB foram consideradas para simulação as três configurações mais comumente utilizadas na arquitetura em contêineres:

1. Uma planta compacta (1PC);
2. Uma planta em forma de L (1PL);
3. Dois pisos (2P).

3.2.5. Orientação e aberturas

Como visto na seção 2.4.2.3, a NBR 15.575 recomenda que a unidade habitacional a ser simulada apresente a condição mais crítica do ponto de vista térmico. Para isto, a norma faz sugestões sobre o posicionamento das aberturas. Seguindo as recomendações indicadas, na montagem das três configurações preliminares considerou-se:

- Eixo principal da edificação com orientação sul-norte;
- Verão: duas janelas, da sala ou dos dormitórios, voltadas para o oeste;
- Inverno: porta de vidro da sala de estar / cozinha voltada para o sul, e a outra parede contendo aberturas voltada para o leste.

3.2.6. Geometrias adotadas

Considerando o apontado nos itens anteriores, os modelos geométricos das três configurações propostas ficaram conformados como mostram as Figura 11, Figura 12 e Figura 13.

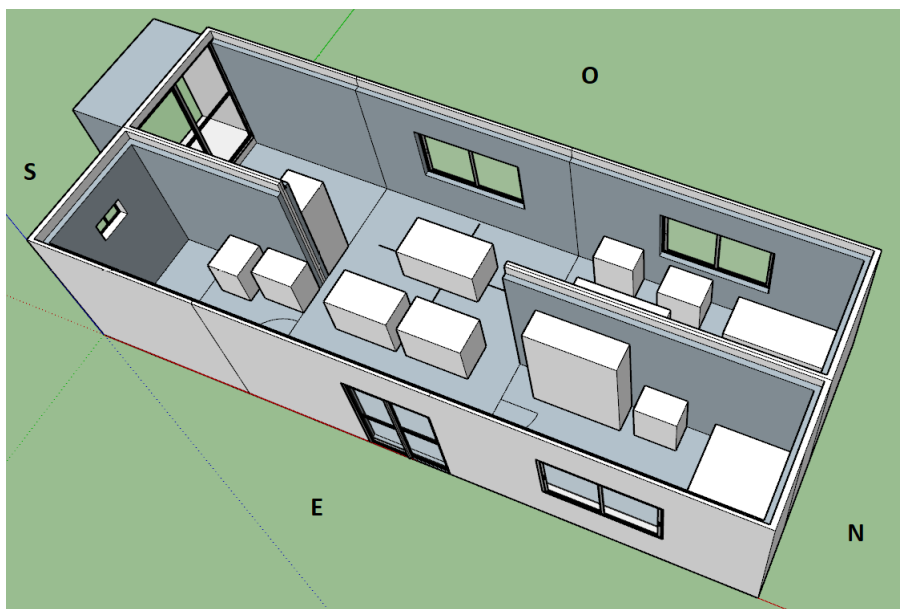


Figura 11: Modelo de uma planta compacto (1PC).

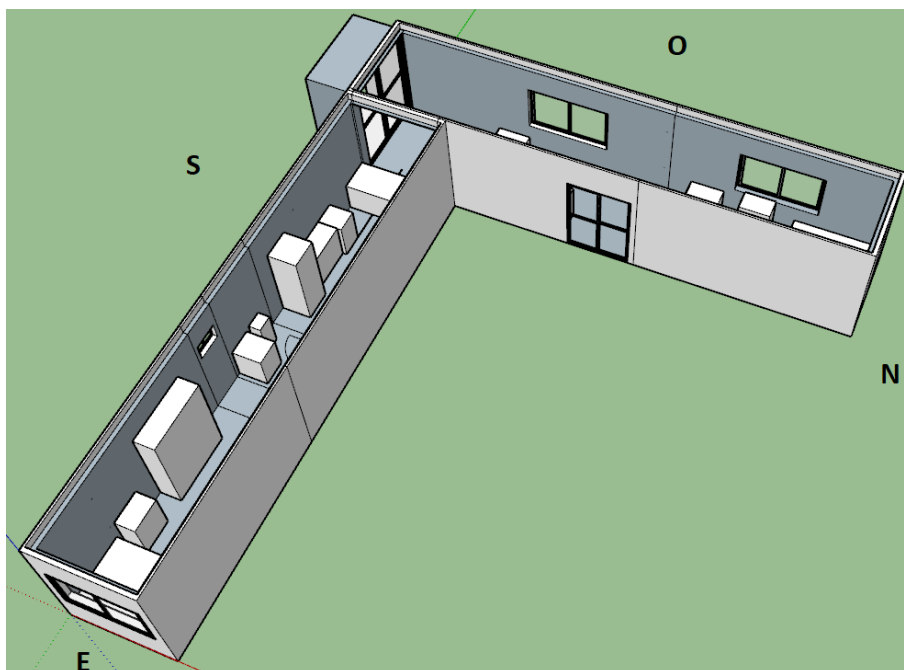


Figura 12: Modelo de uma planta com forma de L (1PL).

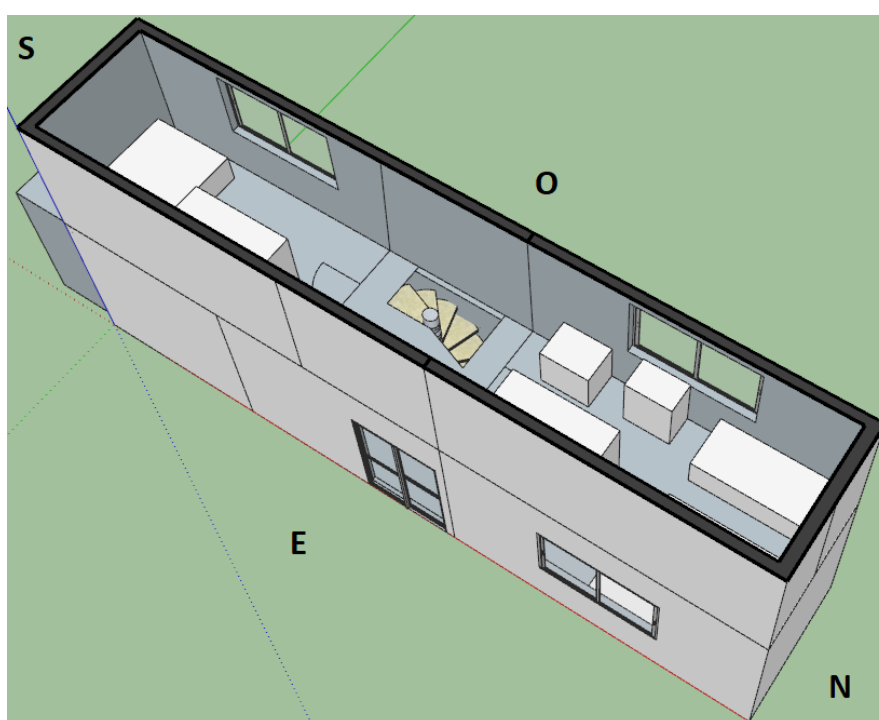


Figura 13: Modelo de dois pisos (2P).

3.3. DEFINIÇÃO DOS MATERIAIS CONSTRUTIVOS

Foi proposto o uso de um sistema semelhante ao *DryWall*, onde as paredes são compostas por placas e em seu interior são embutidas as instalações elétrica e

hidráulica, assim como o isolamento termo-acústico e as guias e montantes nos quais são fixadas as placas (ver item 2.3.1.4). Como visto na seção 2.4.2, a norma 15.575 estabelece exigências de desempenho térmico de acordo à ZB em que se localiza a instalação. Para definir se os materiais construtivos adotados cumprem com as exigências da norma, foi empregado o método simplificado e posteriormente o método de simulação. A continuação explica-se ambos procedimentos e os resultados obtidos considerando que a edificação se situa na zona bioclimática 3 (ZB3), à qual pertence a cidade de Cascavel.

3.3.1. Procedimento 1 – Simplificado

Para avaliar a adequação das paredes externas e cobertura, foi seguido o método de cálculo da NBR 15.220-2, o qual consiste no cálculo da:

- Transmitância térmica

$$U = 1/R_T \quad (1)$$

$$R_T = R_{se} + R_{t1} + \dots + R_{tn} + R_{ar1} + \dots + R_{arn} + R_{si} \quad (2)$$

$$R = e/\lambda \quad (3)$$

Onde:

R_{se} é a resistência térmica superficial externa, cujo valor é tabulado;

$R_{t1}, \dots, R_{tn}$ são as resistências térmicas das n camadas homogêneas, determinadas pela expressão (3);

λ é a condutividade térmica do material;

e é a espessura da camada de material;

$R_{ar1}, \dots, R_{arn}$ são as resistências térmicas das n câmaras de ar, cujos valores são tabulados;

R_{si} é a resistência térmica superficial interna, cujo valor é tabulado.

- Capacidade térmica

$$C_T = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot R_i \cdot c_i \cdot \rho_i = \sum_{i=1}^n e_i \cdot c_i \cdot \rho_i \quad (4)$$

Onde:

c_i é o calor específico do material da camada i^a ;

ρ_i é a densidade de massa aparente do material da camada i^a .

No caso de paredes que tenham na sua composição materiais isolantes térmicos de condutividade térmica menor ou igual a 0,065 W/m.K, e resistência térmica maior que 0,5 m².K/W, o cálculo da capacidade térmica deve ser feito desprezando-se todos os materiais voltados para o ambiente externo, posicionados a partir do isolante ou espaço de ar (ABNT, 2013b).

Na Tabela 13 encontra-se a composição adotada para as paredes externas e cobertura, assim como os resultados do cálculo da resistência e capacidade térmicas. Na Tabela 14, são comparados os resultados obtidos com os exigidos pela NBR 15.575; como a capacidade térmica é menor que o mínimo sugerido na norma, foi necessário proceder com o método de simulação computacional.

Tabela 13: Composição das paredes externas e cobertura

	e (m)	λ (W/m.K)	R (m ² .K/W)	ρ (kg/m ³)	c (J/kg.K)	C _T (kJ/m ² .K)	Fonte
R _{se}			0,04000				(ABNT, 2003)
Aço Corten B	0,0020	16,00	0,00013	8.000	500	desprezado	(STEELSS, 2011)
Câmara de ar*			0,14000			desprezado	(ABNT, 2003)
EPS	0,1000	0,0400	2,50000	25	1.420	3,55	(ABNT, 2003)
Placa de gesso	0,0125	0,35	0,03571	900	840	9,45	(ABNT, 2003)
R _{si}			0,13000				(ABNT, 2003)
Total			2,84584			13	

*Câmara horizontal, superfície com $\epsilon > 0,8$.

Tabela 14: Adequação dos resultados de U e C_T com os requisitos da NBR 15.575

	Zona	α	U _{calc}	U _{15.575}	Cumpre	C _{T,calc}	C _T	Cumpre
Paredes	3	0,5	0,351	$\leq 3,7$	Sim	13	≥ 130	Não
Cobertura	3	0,5	0,351	$\leq 2,3$	Sim	13	-	-

3.3.2. Procedimento 2 – Simulação

As simulações devem ser rodadas para o dia típico de projeto de verão e inverno. Como cidade representativa da ZB3, escolheu-se trabalhar com Florianópolis, por causa dos dados climáticos dos seus dias típicos estarem disponíveis na NBR 15.575-1, conforme mostra a Tabela 15. Para completar o restante de informações requeridas no EnergyPlus, foi utilizado o arquivo climático de Florianópolis da base SWERA (DOE; BTO; NREL, 2019).

Tabela 15: Dados climáticos dos dias típicos para a cidade de Florianópolis.
Fonte: (ABNT, 2013a)

	Temperatura máxima diária (°C)	Amplitude diária de temperatura (°C)	Temperatura de bulbo úmido (°C)	Nebulosidade décimos
Verão	32,7	6,6	24,4	7
Inverno	6,0	7,4	13,4	6

Na Tabela 16, Tabela 17 e Tabela 18, encontra-se a composição dos fechamentos da edificação, as propriedades termo-físicas dos materiais opacos e as propriedades termo-ópticas dos materiais transparentes, a serem ingressados no programa. Com relação aos componentes envidraçados, as janelas utilizam vidro de 4mm e as portas de 6mm de espessura. Além das propriedades dos vidros, foram ingressadas as propriedades da caixilharia e travessas, para os quais foi adotada uma espessura padrão de 0,0572 m e condutividade igual a 56,42 W/m² K, correspondente à janelas de alumínio (LAWRENCE LAB, 2019).

Tabela 16: Composição dos fechamentos internos e externos

Fechamento	Composição
Externo	Chapa metálica (0,2 cm) + Câmara de Ar ($1 \leq e \leq 2$ cm) + EPS (10 cm) + Gesso acartonado (1,25 cm)
Interno simples	Gesso acartonado (1,25 cm) + Câmara de Ar ($2 \leq e \leq 5$ cm) + EPS (5 cm) + Gesso acartonado (1,25 cm)
União dos contêineres	Gesso acartonado (1,25 cm) + EPS (5 cm) + Câmara de Ar ($2 \leq e \leq 5$ cm) + Chapa metálica (0,2 cm) + Chapa metálica (0,2 cm) + Câmara de Ar ($2 \leq e \leq 5$ cm) + EPS (5 cm) + Gesso acartonado (1,25 cm)
Piso	Base de concreto (20 cm) + Câmara de ar ($e > 5$ cm) + <i>Plywood</i> (2,8 cm)
Piso áreas molhadas	Base de concreto (20 cm) + Câmara de ar ($e > 5$ cm) + <i>Plywood</i> (2,8 cm) + argamassa (3 cm) + baldosa cerâmica
Entrepiso	Gesso acartonado (1,25 cm) + Câmara de ar ($e > 5$ cm) + Chapa metálica (0,2 cm) + Câmara de ar ($e > 5$ cm) + <i>Plywood</i> (2,8 cm)
Cobertura	Chapa metálica (0,2 cm) + Câmara de Ar ($1 \leq e \leq 2$ cm) + EPS (10 cm) + Gesso acartonado (1,25 cm)

Tabela 17: Propriedades termo-físicas dos elementos construtivos

Material	e (m)	λ (W/m.K)	ρ (kg/m ³)	c (J/kg.K)	R (m ² K/W)	Fonte
Aço Corten B	0,002	16	8000	500	0,0001	(STEELSS, 2011)
EPS	0,05/0,10	0,04	25	1.420	1,25/2,5	(ABNT, 2003)
Gesso acartonado	0,0125	0,350	900	840	0,0357	(ABNT, 2003)
Plywood	0,028	0,091	460	1.880	0,3087	(ASHRAE, 2013b)
Argamassa	0,030	1,150	1.900	1.000	0,0261	(ABNT, 2003)
Baldosa cerâmica					0,009	(ASHRAE, 2013b)
Concreto	0,20	1,750	2.300	1.000	0,1143	(ABNT, 2003)
Câmara de ar horizontal*	(1 ≤ e ≤ 2 cm)				0,14	(ABNT, 2003)
Câmara de ar horizontal*	(2 < e ≤ 5 cm)				0,16	(ABNT, 2003)
Câmara de ar descendente*	(1 ≤ e ≤ 2 cm)				0,15	(ABNT, 2003)
Câmara de ar descendente*	(e > 5 cm)				0,21	(ABNT, 2003)

*Emissividade hemisférica total - ε maior que 0,8

Tabela 18: Propriedades termo-ópticas dos vidros.
Fonte: (LAWRENCE LAB, 2019)

Modelo	Clear 11501	Clear 11503
d (mm) - espessura	3,840	5,840
SHGC - solar heat gain coefficient	0,883	0,865
SC - shading coefficient	1,015	0,995
Tsol - transmitância solar	0,866	0,840
Rfsol - refletância solar frontal	0,077	0,752
Rbsol - refletância solar posterior	0,770	0,752
Tvis - transmitância visível	0,906	0,900
Rfvis - refletância visível frontal	0,082	0,082
Rbvis - refletância visível posterior	0,802	0,082
λ (W/m K) - condutividade	1	1

Após definição da geometria e dos elementos construtivos, com a finalidade de comprovar os requisitos de desempenho térmico estabelecidos pela NBR 15.575-1 para verão e inverno (Tabela 8 e Tabela 9), os três modelos propostos foram modelados e simulados no programa *EnergyPlus*. Para tal, foram seguidas as recomendações da norma, previamente resumidas no item 2.4.2.3. Na Tabela 19 encontram-se os resultados das simulações rodadas. Começando pelo modelo 1PC, na primeira simulação não se cumpriu com o requisito do verão, o qual estabelece que a temperatura diária máxima do ar interior de ambientes de permanência prolongada, deve ser inferior à temperatura ambiente diária máxima. Em vista disto, procedeu-se a simular o modelo aplicando as alterações estabelecidas na norma: aumentar a taxa de ventilação para 5 ren/h, inserir sombreamento, ou ambas as opções juntas; até

cumprir com os dois critérios de avaliação térmica para verão e inverno, simultaneamente. Uma vez atingidos ambos critérios, na simulação número 5, procedeu-se a variar a absorvância das paredes; chegando à conclusão de que para cumprir com os requisitos térmicos, a cor de projeto deve ser clara.

Tabela 19: Adequação dos modelos à norma NBR 15.575

Mod.	Vent. (ren/h)	Sombr.	α	Temp. (°C)	Ext.	Sala	Dor. 1	Dor. 2	Cumpre
1PC	1	Não	0,3	Mín. Inv.	6,06	9,32	9,90	9,86	Sim
1PC	1	Não	0,3	Máx. Ver.	32,70	38,69	38,99	35,67	Não
1PC	5	Não	0,3	Mín. Inv.	6,06	7,53	7,86	7,84	Não
1PC	5	Não	0,3	Máx. Ver.	32,70	35,82	36,20	33,85	Não
1PC	1	Brise	0,3	Mín. Inv.	6,06	9,36	9,86	9,85	Sim
1PC	1	Brise	0,3	Máx. Ver.	32,70	34,61	34,00	33,00	Não
1PC	1	Curt.	0,3	Mín. Inv.	6,06	9,24	9,75	9,72	Sim
1PC	1	Curt.	0,3	Máx. Ver.	32,70	34,41	34,38	32,24	Não
1PC	1	Brise + curt.	0,3	Mín. Inv.	6,06	9,31	9,77	9,76	Sim
1PC	1	Brise + curt.	0,3	Máx. Ver.	32,70	32,32	31,81	31,23	Sim
1PC	1	Brise + curt.	0,5	Mín. Inv.	6,06	9,33	9,80	9,79	Sim
1PC	1	Brise + curt.	0,5	Máx. Ver.	32,70	33,04	32,70	32,00	Não
1PC	1	Brise + curt.	0,7	Mín. Inv.	6,06	9,34	9,83	9,82	Sim
1PC	1	Brise + curt.	0,7	Máx. Ver.	32,70	33,76	33,57	32,77	Não
1PL	1	Brise + curt.	0,3	Mín. Inv.	6,06	8,21	9,17	9,26	Não
1PL	1	Brise + curt.	0,3	Máx. Ver.	32,70	33,65	31,83	31,07	Não
2P	1	Brise + curt.	0,3	Mín. Inv.	6,06	9,12	7,18	7,22	Não
2P	1	Brise + curt.	0,3	Máx. Ver.	32,70	32,31	33,63	33,38	Não

Com referência aos sistemas de sombreamento simulados, foram aplicadas proteções solares horizontais (brises), cortinas, e ambas alternativas juntas; as características de estes elementos são descritas a continuação:

- Brises

Para identificar a necessidade de sombreamento foi utilizado o programa Analysis-SOL-AR (LABEEE, 2005), o qual traça manchas de temperaturas sobre a carta solar da cidade especificada. Na Figura 14 encontra-se a mancha de temperaturas para a cidade de Florianópolis no período entre 21 de dezembro e 21 de junho. Para fazer uma proteção solar horizontal eficiente, devem-se desenhar os ângulos α , Y_1 e Y_2 , de forma a bloquear a área vermelha da carta solar. A título de exemplo, para projetar o brise da fachada L, primeiro desenharam-se os ângulos necessários para bloquear o sol indesejável ($\alpha = 50^\circ$; $Y = 60^\circ\text{C}$). Em razão de evitar

projetar um brise excessivamente grande e para que a placa tivesse a mesma dimensão em saliência da parede, parte do sol poderá penetrar no ambiente em alguns períodos. Após definidos os ângulos, aplicando trigonometria facilmente calculam-se as dimensões que definem os brises: x_1 , x_2 e p , bosquejadas na Figura 15. Seguindo o mesmo procedimento para as janelas da fachada oeste e portas, foram obtidos os resultados da Tabela 20. No caso das portas de vidro, por uma questão de espaço, não foram consideradas saliências nas laterais.

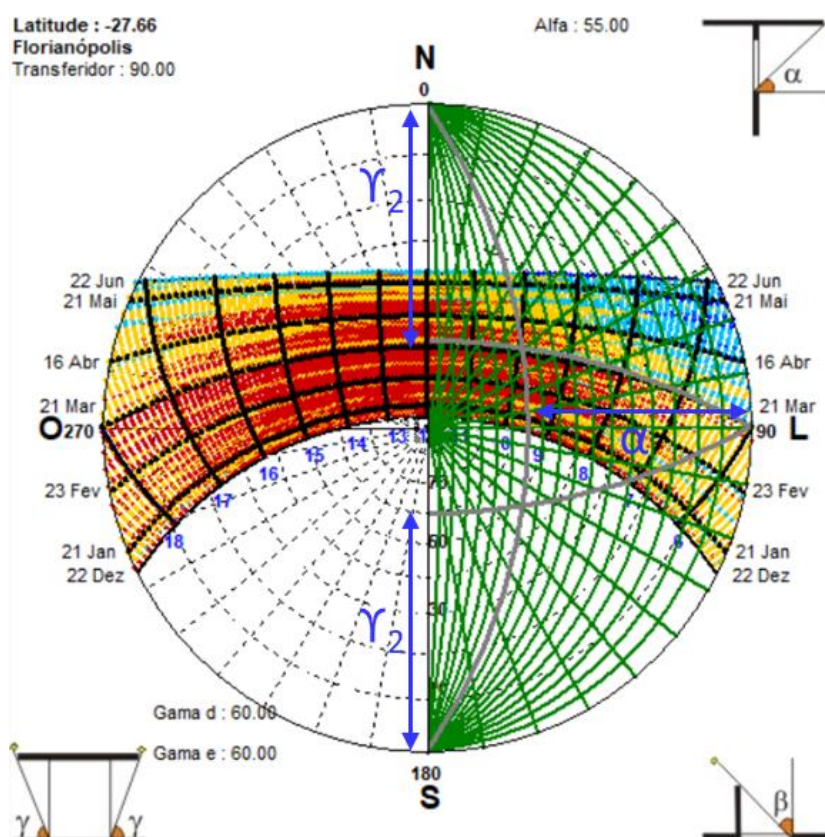


Figura 14: Mancha de temperaturas para Florianópolis 21 de dez. a 21 de jun.
Fonte: Elaborado pelo autor no programa SOL-AR 6.2. (LABEEE, 2005).

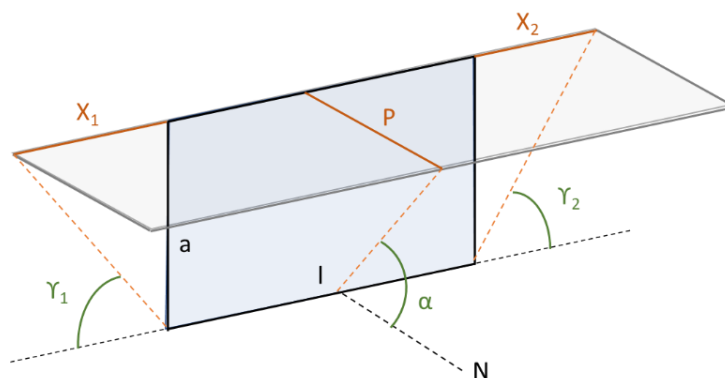


Figura 15: Variáveis geométricas da janela com brise horizontal.

Tabela 20: Dimensões dos brises horizontais calculados

Abertura	l	a	α	Y_1	Y_2	p	x_1	x_2
Janelas Este	2	1,2	55	60	60	0,84	0,69	0,69
Janelas Oeste	2	1,2	45	60	60	1,20	0,69	0,69
Porta Este	2	1,5	55	-	-	0,84	0,1	0,1

- Cortinas

Os tecidos para cortinas são classificados em nove tipos principais, de acordo à transparência e refletância dos fios (ASHRAE, 2013a). Nas simulações foi adotado um tecido relativamente fechado e de cor branca, cujas propriedades são apresentadas na Tabela 21. As cortinas foram posicionadas em todas as aberturas envidraçadas, considerando que as mesmas estão ativas quando a soma da radiação direta e difusa exceder um valor estabelecido igual a 50 W/m².

Tabela 21: Propriedades óticas da cortina utilizada nas simulações.

Fonte: (KOTEY; WRIGHT; COLLINS, 2009)

Cor	Código	Foto	Transmitância solar	Reflectância solar
Branco	IIL		0,43	0,56

Dado que a distribuição e orientação dos ambientes internos nos três modelos geométricos apresenta variações, a comparação das temperaturas interiores de cada espaço não necessariamente representa melhor desempenho térmico da edificação como um todo. Por este motivo, foi calculada a carga térmica total da edificação nos dias de projeto, resultando nos valores da Tabela 22. Observa-se que a edificação com melhor desempenho térmico é o modelo de dois pisos, sendo que no verão apresenta a maior carga dos três modelos e no inverno a menor; devido à maior superfície exposta ao exterior e à menor área de contato com o solo. Apesar do modelo de dois pisos ter apresentado o melhor desempenho térmico, o MB adotado é o de uma planta compacta, em razão de ter cumprido com os requisitos de desempenho térmico (Tabela 19) e apresentar melhor comportamento durante o período quente, o qual é o mais significativo.

Tabela 22: Carga térmica dos três modelos geométricos de edificação propostos

Modelo	Carga Inverno (kWh)	Carga Verão (kWh)	Total (kWh)
1PC	51,34	34,00	85,35
1PL	53,26	32,94	86,19
2P	49,67	35,48	85,15

Deste modo, o MB a partir do qual serão implementadas as estratégias de melhoria do desempenho energético ficou configurado como indica a Figura 16.

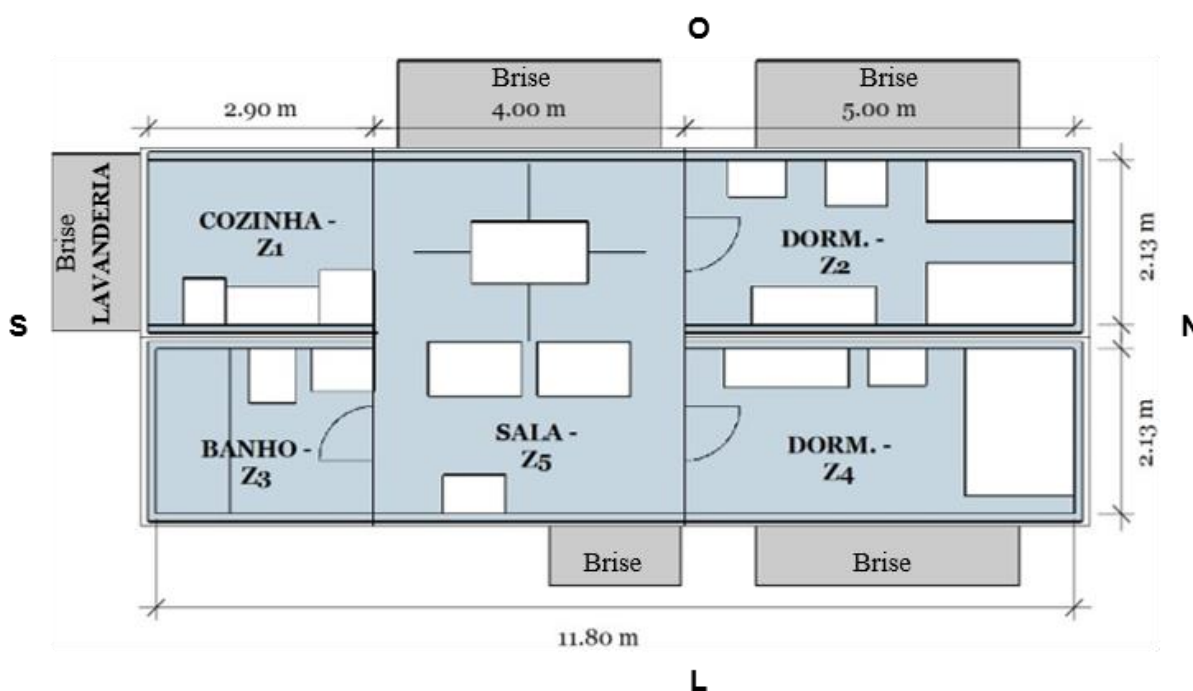


Figura 16: Planta baixa simplificada do MB.

3.4. DEFINIÇÃO DAS CARGAS INTERNAS

Cada uma das cargas térmicas descritas nos itens listados a continuação foi ingressada como um *internal gain* no MB.

3.4.1. Ocupação de pessoas

Na Figura 17 encontra-se o cronograma diário de ocupação das diferentes zonas da residência. Foi adotada a taxa de liberação de calor por pessoa de 115 W, recomendada pela NBR 16401-1, correspondente a um indivíduo realizando trabalho leve e ajustada para os sexos feminino e masculino (ABNT, 2008b).

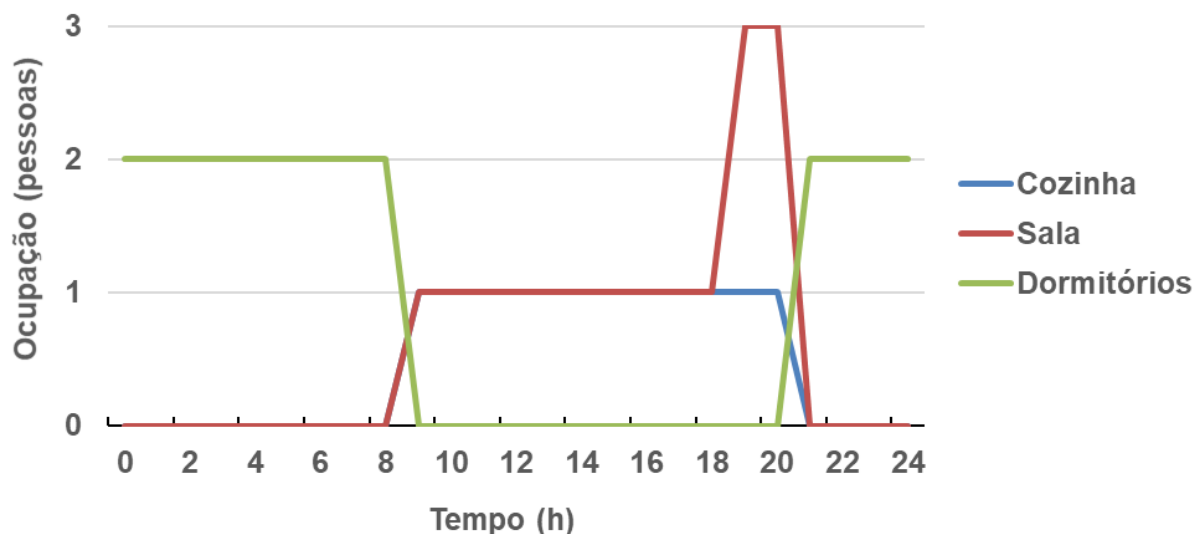


Figura 17: Cronograma de ocupação da cozinha, sala-comedor e dormitórios.

3.4.2. Iluminação

A escolha das lâmpadas foi realizada visando um baixo consumo de energia, limitação das emissões de calor e garantia do conforto de iluminação interna. Para atender essas metas, foram escolhidas lâmpadas LED. A quantidade mínima de lâmpadas e luminárias foi calculada utilizando o método os lúmens. Para tanto, foram executados os seguintes passos:

- Identificação das características do ambiente e escolha do nível de iluminamento de acordo com a NBR 5413, a qual estabelece a iluminância requerida por classe de tarefa visual (ABNT, 1992).
- Determinação do índice do recinto (K), no caso de iluminação indireta:

$$K = \frac{3 \cdot C \cdot L}{2 \cdot (h + hl) \cdot (C + L)} \quad (5)$$

As variáveis requeridas na equação (5) encontram-se listadas na Tabela 23, junto à iluminância requisitada para cada ambiente e os resultados do cálculo de K.

Tabela 23: Variáveis de entrada para o método dos lúmens

Ambiente	Cozinha – ZT1	Sala – ZT5	Dorm. I – ZT2	Dorm. II – ZT4	Banho – ZT3
Iluminância média - Em (lux)	200	150	150	150	150
Comprimento – C (m)	2,9	4	5	5	2,9
Largura – L (m)	2,13	4,66	2,13	2,13	2,13
Altura de suspensão - hI (m)	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052
Altura de montagem - h (m)	1,898	1,898	1,898	1,898	1,898
Altura do plano de trabalho – hm	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
Pé direito – PD (m)	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7
Índice do local - K	0,9446	1,6557	1,1490	1,1490	0,9446

- Determinação do fator de utilização (Fu), o qual indica a eficiência do conjunto luminária, lâmpada e recinto. Para sua determinação é preciso conhecer a refletância do teto e paredes, no caso 70%, correspondente a superfícies de cor branca. Uma vez selecionada a luminária, utilizando o manual do fabricante, o índice K é cruzado com os índices de reflexão do teto e paredes, e assim obtido Fu (PHILIPS, 2019a).
- Definição do número mínimo de luminárias necessárias:

$$N = \frac{Em \cdot A}{\varphi \cdot Fu \cdot FPL} \quad (6)$$

Onde A é a área do recinto, φ o fluxo luminoso da lâmpada escolhida e FPL o fator de perdas luminosas, sendo igual a 0,90 para ambientes limpos e limpeza da superfície a cada 12 meses.

Na Tabela 24 encontra-se o resultado do cálculo de N para uma luminária LED e duas lâmpadas do tipo bulbo. A quantidade de lâmpadas a serem ingressadas em cada ambiente foi decidida adotando os N que se encontram mais próximos de um valor inteiro.

Tabela 24: Determinação do tipo e quant. de lâmpadas/luminárias por ambiente.
Fonte: (PHILIPS; 2019a, 2019b)

Modelo	Luminária SM480C LED35S		Bulbo 929001838512		Bulbo 929001838312		
Fluxo lum. - ϕ	3500		806		560		
Potência	32		8		6		
	Fu	N	Fu	N	Fu	N	DECISÃO
Cozinha – Z1	0.73507	0.5335	1	1.7031	0	2.4512	2 x Bulbo 8W
Sala – Z5	0.92803	0.9565	1	3.8544	1	5.5476	1 x Luminária 32W
Dorm. I – Z2	0.80768	0.6279	1	2.2022	1	3.1696	1 x Luminária 32W
Dorm. II – Z4	0.80768	0.6279	1	2.2022	1	3.1696	1 x Luminária 32W
Banho – Z3	0.73507	0.4002	1	1.2773	1	1.8384	2 x Bulbo 6W

Considerou-se que as luzes estão acesas durante o período de ocupação de cada cômodo (Figura 17). Além disso, para o controle de iluminação foi utilizado o objeto *Daylighting:Controls*, a partir do qual é possível controlar a potência das lâmpadas em função da iluminação natural que o programa calcula nos pontos de referência ingressados. Conforme Figura 18, foram utilizados dois *steps* e o *setpoint* da iluminância como sendo 150 lux na sala e dormitórios, e 200 lux na cozinha (Tabela 23). A modo de exemplo, quando em um dos dormitórios a iluminância é maior que 150 lux no ponto de referência indicado na Figura 19, a lâmpada permanece desligada; quando a iluminância se encontra entre 75 e 150 lux, somente uma das lâmpadas do soquete permanece acesa; e quando a iluminância é menor do que 75 lux, as duas lâmpadas contidas no soquete ficam acesas. Também, desde que a interrupção das lâmpadas se considera feita de forma manual, considerou-se uma probabilidade de as luzes serem desligadas quando necessário de 70%, a qual foi ingressada no objeto *Probabilithy Lighting will be Reset When Needed in Manual Stepped Control*. Deste modo, quando a iluminância excede 150 lux, as lâmpadas estarão desligadas 70 % do tempo e acesas nos 30 % restantes. Considerando que o objetivo do trabalho é chegar em uma proposta de NZEB de baixo custo, não foi considerado o uso de sistemas de controle automáticos, por causa do aumento que isto implicaria no investimento.

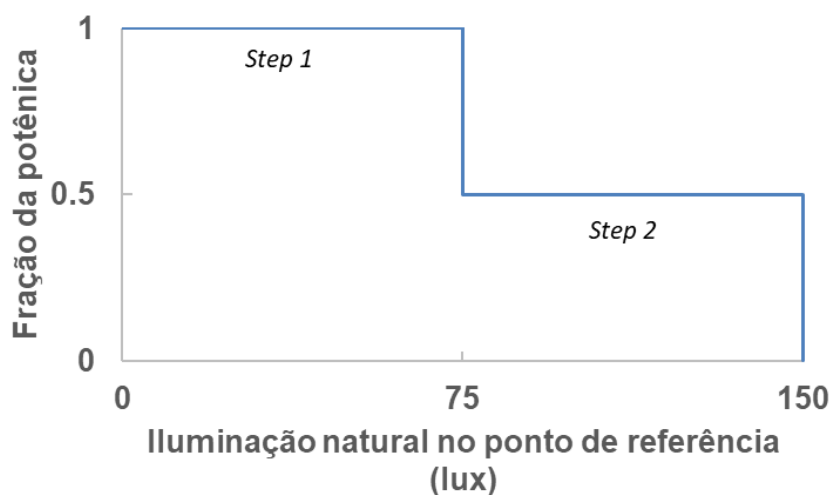


Figura 18: Controle de iluminação escalonado com 2 etapas.

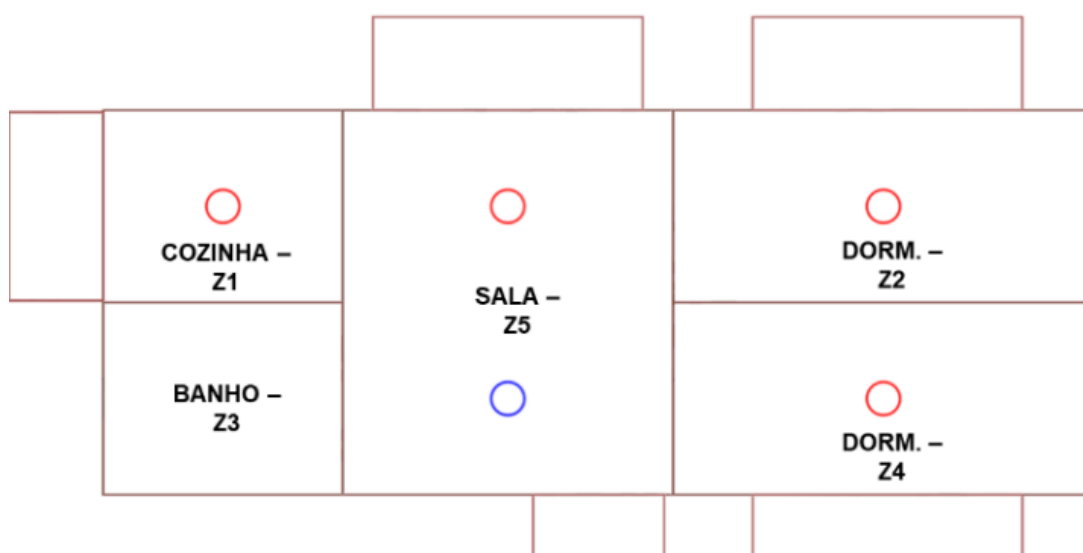


Figura 19: Pontos de referência para controle da luz natural. Altura = 0,75 m.

3.4.3. Equipamentos elétricos

A energia consumida pelos equipamentos elétricos transforma-se em um ganho de calor da zona térmica ou é expedida para o exterior. Com base no simulador de consumo da Companhia Paranaense de Energia (COPEL) e as estimativas de consumo médio mensal de eletrodomésticos do PROCEL, foi construída a Tabela 25, na qual apresentam-se os aparelhos elétricos alocados em cada zona da casa.

Tabela 25: Estimativa do consumo dos eletrodomésticos.
Fonte: (COPEL, 2019b; ELETROBRAS; PROCEL, 2015)

Ambiente	Carga	Quant.	Pot. (kW)	Horas (uso/dia)	Dias (uso/mês)	Cons. diário (kWh)	Cons. mensal (kWh)
Cozinha - Z1	Geladeira 1 porta	1	0,13	24	30	0,840	25,20
	Liquidificador	1	0,30	0,167	8	0,050	0,40
	Micro-ondas	1	1,20	0,167	30	0,200	6,00
	Fogão (a gás)*	1	1,67	1	30	1,670	50,10
Dorm. - Z2	Notebook	2	0,02	4	30	0,160	4,80
Banho - Z3	Chuveiro solar**	1	4,50	0,533	30	2,400	14,40
	Secador cabelo	1	1,00	0,167	30	0,167	5,00
Dorm. - Z4	TV 32" LCD	1	0,095	4	30	0,380	11,40
Sala - Z5	TV 32" LCD	1	0,095	4	30	0,380	11,40
	Computador	1	0,063	3	30	0,189	5,67
Lavanderia	Lavadora 8kg	1	0,35		8	0,23 kWh/ciclo	1,84
						Cons. Anual	1.048

*O fogão contabiliza como um ganho de calor dentro da cozinha, porém não como carga elétrica;

**Considerou-se uma fração solar de 80%, portanto só 20% da demanda requerida pelo chuveiro é suprida com energia elétrica.

3.5. DEFINIÇÃO DO SISTEMA DE AR-CONDICIONADO

O tipo de ar condicionado adotado é o *mini-split*, por ser este o mais amplamente utilizado para aplicações residenciais. De acordo com a NBR 16401-1, este sistema é constituído por uma unidade de tratamento de ar de expansão direta, de pequena capacidade (geralmente inferior a 10 kW), instalada dentro do ambiente a que serve (designada unidade interna), geralmente projetada para insuflação do ar por difusor incorporado ao gabinete, sem dutos; suprida em fluido refrigerante líquido por uma unidade condensadora, instalada externamente (designada unidade externa) (ABNT, 2008b).

3.5.1. Simulação em *autosized*

Para realizar o cálculo de dimensionamento de cada um dos *mini-split*, foi rodada uma simulação com os parâmetros de projeto em *autosize*, utilizando o objeto *HVACTemplate:System:UnitarySystem*, indicado no manual do EnergyPlus para modelagem de este tipo de aparelho (DOE, 2016). Esta simulação foi rodada para os dias de projeto de verão e inverno (ver Tabela 15), utilizando um *timestep* igual a 6

por hora. Em outras palavras, o programa calcula o balanço de calor das zonas a cada 10 minutos. A temperatura operativa do termostato e umidade relativa adotadas na simulação, encontram-se na Tabela 26. Em total, foram modelados três aparelhos de ar-condicionado, um deles atende à cozinha e sala em conjunto (Z1 e Z5), e os outros dois a cada um dos dormitórios (Z2 e Z4).

Tabela 26: Parâmetros do termostato com base na NBR 16401-2

Zonas	Temp. verão (°C)	Temp. inv. (°C)	UR verão (%)	UR inv. (%)
Z1 - Z5, Z2, Z4	24	22	30-60	35-65

O EnergyPlus realiza o cálculo da carga térmica para cada *timestep* nos dias de projeto, e retribui os valores do dimensionamento de componentes no arquivo .EIO. Os parâmetros mais importantes resultantes do dimensionamento, encontram-se na Tabela 27.

Tabela 27: Resultados do dimensionamento

	Z1-Z5	Z2	Z4
Capacidade de refrigeração - W (BTU/h)	2.700 (9.214)	859 (2.932)	746 (2.544)
Capacidade de aquecimento - W (BTU/h)	2.700 (9.214)	859 (2.932)	746 (2.544)
Vazão de suprimento de ar (m³/h)	391	125	108

3.5.2. Simulação dos modelos comerciais

A partir dos resultados do dimensionamento foram selecionados três modelos de condicionadores de ar comerciais, cujas características encontram-se na Tabela 28. Na escolha foram considerados, que a capacidade fosse o mais próxima possível da calculada, a confiabilidade da marca e a classe de eficiência do selo Procel (INMETRO, 2018). Além disso, foram considerados aparelhos do tipo reverso, capazes de resfriar durante o verão e aquecer durante o inverno.

Tabela 28: Características dos condicionadores de ar comerciais selecionados.
Fonte: (CARRIER, 2015)

	Z1-Z5	Z2	Z4
Fabricante	Carrier	Carrier	Carrier
Modelo	42LUQC12C5/ 38KQH12C5	42LUQC07C5/ 38KQH07C5	42LUQC07C5/ 38KQH07C5
Tipo	Hi-wall	Hi-wall	Hi-wall
Cap. nom. de refrigeração - W (BTU/h)	3.520 (12.000)	2.050 (7.000)	2.050 (7.000)
Cap. nom. de aquecimento - W (BTU/h)	3.370 (11.500)	1.900 (6.500)	1.900 (6.500)
Vazão de supr. de ar (m³/h)	580	400	400
Eficiência	3,03	3,24	3,24
Classificação Inmetro	B	A	A

Os campos em *autosize* foram substituídos pelos valores do catálogo, e o horário de funcionamento dos condicionadores de ar considerado como sendo igual às horas de ocupação (ver Figura 17). Agora que o MB ficou completamente definido, foi rodada a simulação do consumo energético anual para a cidade de Florianópolis. Seguidamente, foram executadas as simulações de consumo para o restante das zonas bioclimáticas, cujas características climáticas são definidas no item que prossegue. Os resultados das simulações dos MBs são apresentados na seção 4.1.

Cabe ressaltar, que para o total de zonas bioclimáticas, também foi repetido o procedimento da seção 3.5.1. De este modo, através de simulações rodadas com os parâmetros de projeto em *autosize*, verificou-se que as capacidades dos modelos de ar condicionado comerciais fossem sempre maiores que as capacidades calculadas para cada ZB; e portanto, os modelos comerciais escolhidos conseguem satisfazer a demanda em condicionamento de ar de todas as zonas bioclimáticas sob estudo.

3.6. CARACTERÍSTICAS DAS ZONAS BIOCLIMÁTICAS EM ANÁLISE

A Figura 20 exhibe as cidades escolhidas como representativas de cada uma das zonas bioclimáticas em que se divide o território brasileiro. Os arquivos climáticos de ditas cidades serão os utilizados nas otimizações e simulações por ZB executadas ao longo do presente trabalho.

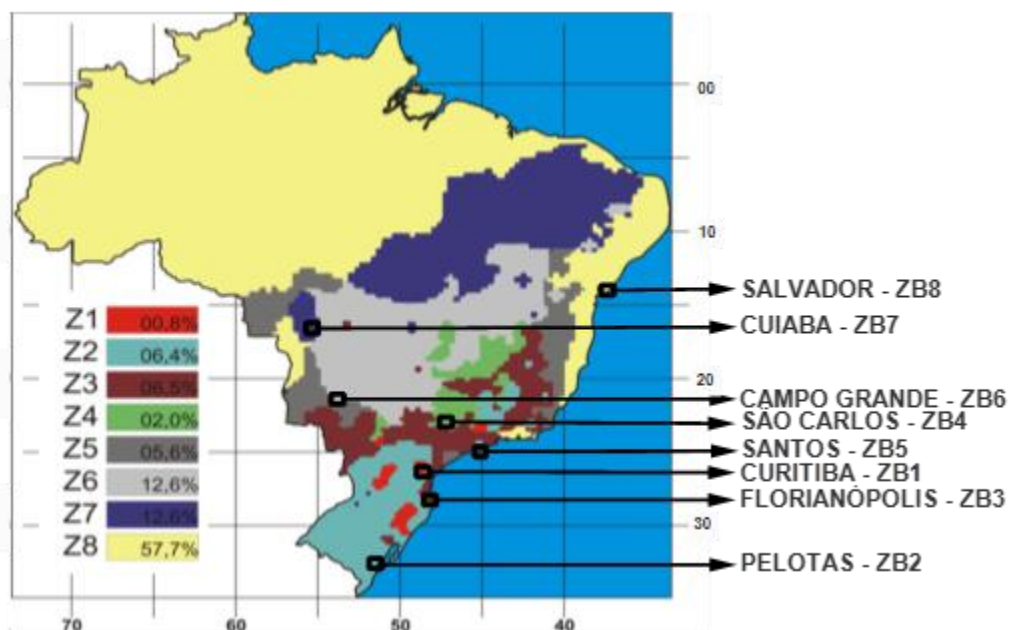


Figura 20: Cidades representativas de cada zona bioclimática.
Fonte: Elaborado pelo autor a partir do programa ZBBR.

Na Figura 21 e Figura 22 são apresentadas as características climáticas: temperatura e irradiação das cidades representativas de cada ZB. As ZBs 3, 4, 5 e 6 são as que apresentam temperaturas mais moderadas, com médias que variam entre os 20 e 25 °C. As ZBs 1 e 2 são as mais frias e as 7 e 8 as mais quentes. As ZBs 4, 6, 7 e 8, destacam-se por possuir as irradiações médias mensais mais elevadas, sendo que as suas médias anuais são sempre superiores aos 5 kWh/m².dia.

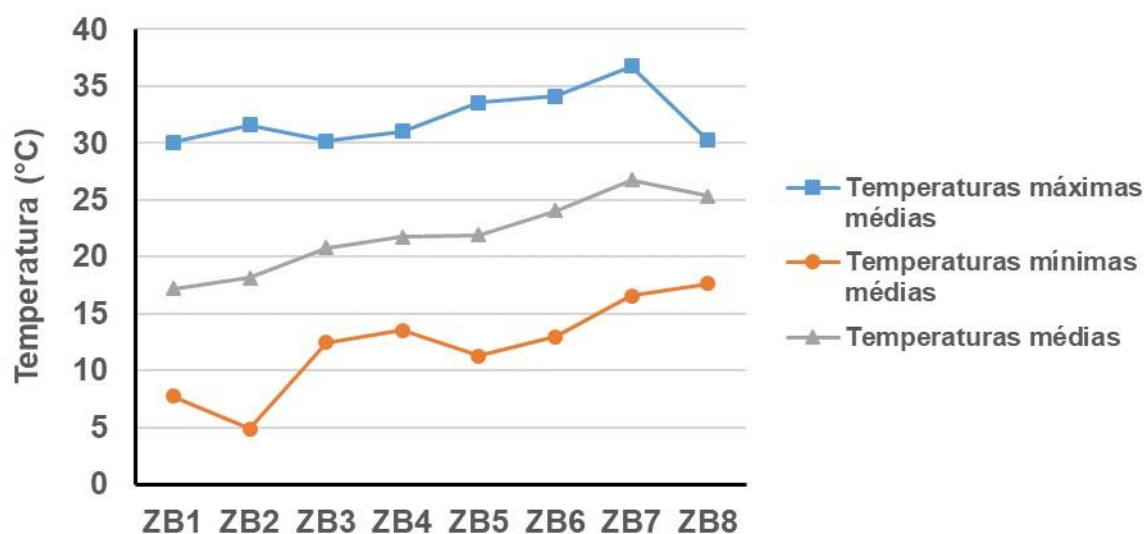


Figura 21: Temperaturas máximas, mínimas e médias das ZBs.
Fonte: (DOE; BTO; NREL, 2019).

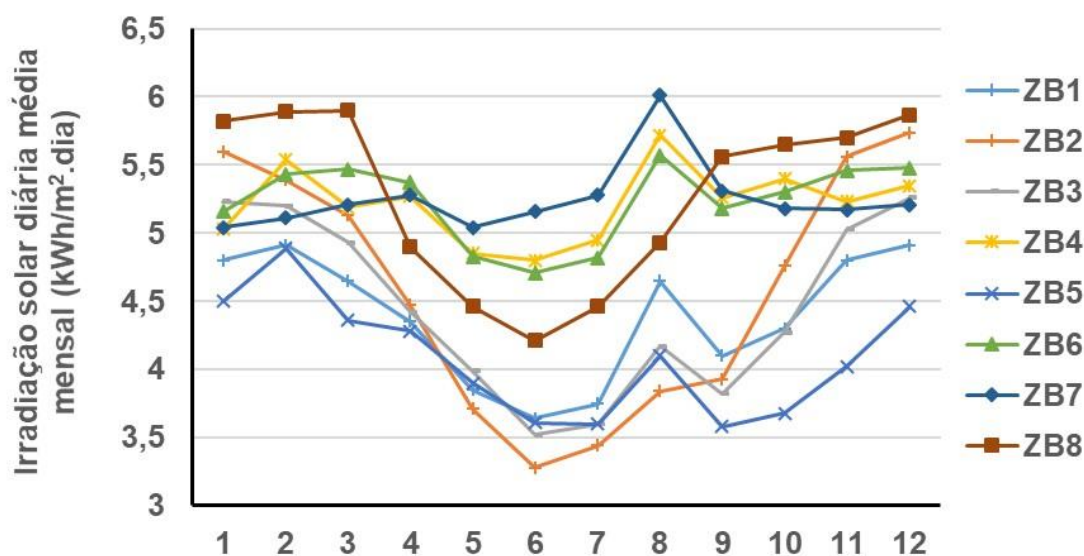


Figura 22: Irradiação solar diária média mensal
Fonte: CRESESB (2019).

3.7. DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DA OTIMIZAÇÃO DO MODELO BASE

O programa escolhido como motor da otimização foi o GenOpt. Com base na Figura 23, para realizar uma otimização, GenOpt roda as simulações da seguinte maneira: primeiro, lê os arquivos *input template*, que são os arquivos de entrada da simulação onde os valores numéricos de cada variável independente foram substituídos pelo nome da variável. Em seguida, substitui os nomes das variáveis por valores numéricos (determinados pelo algoritmo de otimização escolhido). Depois, o GenOpt inicia o programa de simulação, aguarda até que a simulação seja concluída, e lê os arquivos *log* e de saída resultantes. O arquivo *log* indica se a simulação teve erro. Se não teve, o GenOpt procura o valor da função objetivo nos arquivos de saída da simulação. O arquivo de inicialização (*inicialization file*) informa a localização dos arquivos. O arquivo de comando (*command file*) lista os parâmetros independentes, seus limites, e especifica qual algoritmo da biblioteca deve ser selecionado. O arquivo de configuração (*configuration file*) informa quais mensagens no arquivo *log* indicam um erro de simulação e como o GenOpt deve iniciar a otimização (WETTER, 2000).

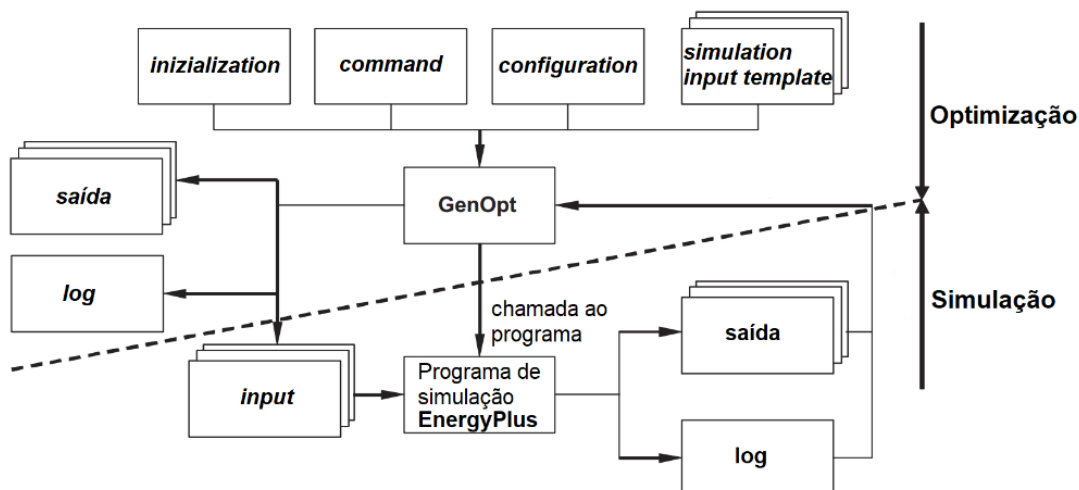


Figura 23: Interface entre GenOpt e EnergyPlus.
Fonte: Adaptado de Wetter (2000).

Das fases da otimização indicadas na Tabela 11, por enquanto foi criado o modelo computacional da edificação. A continuação, devem ser definidas as funções objetivo, selecionar as variáveis independentes, o algoritmo; e finalmente transcrever estas informações à linguagem do GenOpt para obter resultados.

3.7.1. Funções objetivo a serem minimizadas

A modo de exemplo, se o objetivo for reduzir o consumo de energia em ar condicionado, adicionar mais isolamento seria naturalmente uma solução. No entanto, quando é feito um investimento maior no isolamento do edifício, haverá um limite para a espessura, além do qual qualquer aumento não será economicamente viável. Assim, uma boa escolha é minimizar não só o consumo de energia, mas também o LCC. A fórmula geral do LCC é a seguinte (FULLER; PETERSEN, 1996):

$$LCC = \sum_{t=0}^N \frac{C_t}{(1 + D)^t} \quad (7)$$

Onde:

LCC = Valor presente líquido (VPL) de uma dada alternativa de projeto;

C_t = Soma de todos os custos relevantes, incluindo os custos iniciais e futuros, menos quaisquer fluxos de caixa positivos;

N = Número de anos do período do estudo;

D = Taxa de desconto usada para ajustar os fluxos de caixa ao valor presente (VP).

Para projetos de conservação de energia em edificações o LCC pode ser definido como segue:

$$LCC = I + Subs - Res + E + OM\&R \quad (8)$$

Onde:

I = VP do investimento;

$Subs$ = VP dos custos de substituição;

Res = VP do valor residual (valor de revenda, sucata, etc.);

E = VP dos custos de energia;

$OM\&R$ = VP dos custos de operação, manutenção e reparo sem uso de combustível.

No presente trabalho, o valor absoluto do LCC não é calculado, senão a diferença (dLCC) entre o LCC para cada alternativa (LCC_i) e aquele do caso base (LCC_b). Dessa forma, não há necessidade de incluir os custos de todos os componentes do edifício, mas somente as diferenças produzidas pela variação de parâmetros especificados entre o MB e qualquer outra alternativa de projeto. Das variáveis consideradas na otimização (seção 3.7.2), as que implicam em custos adicionais são as películas de controle solar e a espessura do isolamento; portanto da equação (8) devem ser consideradas as diferenças de custo de investimento, substituição e energia. Desta forma, as funções a serem minimizadas são o dLCC e a parte do consumo de energia ($Cons$) que sofrerá variações a cada iteração, definidas como:

$$dLCC = dI + dSubs + dE = LCC_i - LCC_b \quad (9)$$

$$Cons = Cons_{HVAC} + Cons_{illum} \quad (10)$$

Onde,

$Cons_{HVAC}$ = Consumo em condicionamento de ar;

$Cons_{illum}$ = Consumo em iluminação.

Tanto $Cons_{HVAC}$ quanto $Cons_{illum}$ são variáveis calculadas pelo EnergyPlus e se encontram diretamente no arquivo de saída da simulação, logo no *initialization file* só é necessário indicar a sua localização dentro desse arquivo de saída. No caso do dLCC, esta não é uma saída direta do EnergyPlus; portanto o seu cálculo deverá ser realizado a partir de equações dependentes de alguma das variáveis de saída. Estas

equações devem ser ingressadas manualmente no *inicialization file*, na forma de linguagem de programação.

Para definir as equações para o cálculo de (9), primeiramente devem ser estipulados os parâmetros econômicos. Começando pela taxa de desconto (D), para sua definição foi seguida a metodologia apresentada por Cruz (2016). Desta forma, foi realizada a média nos últimos 10 anos das principais aplicações financeiras disponíveis no mercado: taxa SELIC (BCB, 2019), Poupança (ABECIP, 2019) e Certificados de Depósito Interbancário (PORTAL BRASIL, 2019), conforme indica a Tabela 29.

Tabela 29: Rentabilidade das principais aplicações financeiras

Ano	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	Δ% (08/18)
SELIC (% a.a.)	12,196	10,344	9,686	11,668	8,833	7,928	10,713	13,213	14,119	10,588	6,494	10,525
Poupança (% a.a.)	7,741	7,093	6,806	7,501	6,575	6,318	7,020	7,945	8,348	6,999	6,168	7,138
CDI (% a.a.)	12,378	9,876	9,750	11,595	8,397	8,064	10,813	13,239	13,998	9,925	6,421	10,405
												9,356

Similarmente, para determinar a taxa com que o custo da eletricidade cresce, foi realizada a média nos últimos 10 anos do histórico dos reajustes tarifários, para as classes residencial e rural, como indica a Tabela 30.

Tabela 30: Histórico das tarifas médias das classes de consumo residencial e rural.
Fonte: COPEL, 2019a e EPE, 2018

Ano	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	Δ% (09/19)
Residencial (R\$/kWh)	0,3968	0,4058	0,4381	0,4509	0,3856	0,4128	0,5785	0,6143	0,6132	0,7690	0,7988	
Ajustes (%)		2,219	7,384	2,819	-16,909	6,586	28,638	5,820	-0,170	20,255	3,7319	6,037
Rural (R\$/kWh)	0,2562	0,2680	0,2735	0,2978	0,2266	0,2500	0,3475	0,3610	0,3764	0,5383	0,6071	
Ajustes (%)		4,409	2,012	8,154	-31,398	9,350	28,065	3,719	4,109	30,068	11,333	6,982

O restante das variáveis necessárias é definido na Tabela 31. Para determinar os preços, foi utilizado o Gerador de Preços para Construção Civil (CYPE, 2019). As tarifas elétricas consideradas são as da COPEL, cujo último reajuste ocorreu em junho de 2019 (COPEL, 2019a). A projeção da inflação foi tomada das projeções de longo prazo feitas pelo banco Bradesco (BRADESCO, 2019). A vida útil do projeto foi

determinada a partir da NBR 15575-1 (ABNT, 2013a). Para converter uma taxa de real (letra minúscula – sem inflação, I) a nominal (letra maiúscula – inclui inflação, I) foi utilizada a relação (FULLER; PETERSEN, 1996),

$$d = \frac{1+D}{1+I} - 1 \quad \text{ou} \quad D = (1+I)(1+d) - 1 \quad (11)$$

Tabela 31: Parâmetros econômicos necessários no cálculo da função objetivo LCC

Variáveis para o cálculo dos custos de investimento		
Preço EPS	266,9	R\$/m ³
Área paredes externas	93,3	m ²
Área cobertura	55,9	m ²
Área total	149,2	m ²
Preço vidro simples 4mm	73,9	R\$/m ²
Transmitância média vidro simples - τ_p	0,8860	adm.
Preço películas solares	157,8	R\$/m ²
Transmitância média vidro simples + película	0,3346	adm.
Vida útil películas solares	10	anos
Área janelas oeste	6,28	m ²
Variáveis para o cálculo dos custos de energia		
Tarifa elétrica residencial - T_{rs}	0,79878	R\$/kWh
Tarifa elétrica rural - T_{rr}	0,60707	R\$/kWh
Taxa aumento tarifa nom. residencial - E_{rs}	6,037	% a.a.
Taxa aumento tarifa real residencial - e_{rs}	2,204	% a.a.
Taxa aumento tarifa nom. rural - E_{rr}	6,982	% a.a.
Taxa aumento tarifa real rural - e_{rr}	3,115	% a.a.
Consumo elétrico de MB	3.055,7	kWh/ano
Consumo em HVAC do MB	1.685,7	kWh/ano
Consumo em iluminação do MB	322,0	kWh/ano
Demais parâmetros econômicos		
Inflação - I	3,750	% a.a.
Taxa de desconto nominal - D	9,356	% a.a.
Taxa de desconto real - d	5,407	% a.a.
Vida útil do projeto - N	50	anos

Uma vez estipulados os parâmetros econômicos, foi necessário definir o cálculo dos três termos da equação (9).

1. Diferença do custo de investimento (dI)

Igual à soma das diferenças no investimento em isolamento térmico (dI_{isol}) e vidros (dI_{vid}), entre o MB (b) e as alternativas (i).

$$dI = dI_{isol} + dI_{vid} \quad (12)$$

Como o investimento não é uma variável de saída do modelo de simulação, o mesmo deve ser calculado em função de alguma variável que sim seja uma saída direta do *EnergyPlus*.

- Para o cálculo do investimento em isolamento térmico desenvolveu-se uma expressão em função da variável espessura, como segue:

A diferença do custo de investimento em isolamento térmico (dI_{isol}) é igual à diferença entre o investimento em isolamento de uma dada alternativa ($I_{isol,i}$) e o investimento em isolamento do MB ($I_{isol,b}$),

$$dI_{isol} = I_{isol,i} - I_{isol,b} \quad (13)$$

O investimento em isolamento térmico a partir do preço por unidade de volume calcula-se,

$$I_{isol} = \text{Preço do EPS} \left(\frac{R\$}{m^3} \right) \cdot \text{Área de aplicação (m}^2\text{)} \cdot \text{Espessura (m)} \quad (14)$$

Utilizando (14) em (13) e os valores da Tabela 31, chegou-se na seguinte função,

$$\begin{aligned} dI_{isol} &= 149,2 \, m^2 \cdot 266,9 \, \frac{R\$}{m^3} \cdot esp_i - 149,2 \, m^2 \cdot 266,9 \, \frac{R\$}{m^3} \cdot 0,1 \, m \\ dI_{isol} &= 149,2 \, m^2 \cdot 266,9 \, \frac{R\$}{m^3} \cdot (esp_i - 0,1) \, m \end{aligned} \quad (15)$$

dependente unicamente da espessura do isolamento de uma dada alternativa (esp_i) e apta para ser ingressada no *inicialization file*. Simplificando,

$$dI_{isol} = 39.821 \cdot esp_i - 3.982 \quad (16)$$

- Para o cálculo do investimento em vidros foi seguido o seguinte procedimento:

A diferença do custo de investimento nos vidros (dI_{vid}), é igual à diferença entre o investimento em vidro em uma dada alternativa ($I_{vid,i}$) e o investimento em vidro simples do MB ($I_{vid,b}$),

$$dI_{vid} = I_{vid,i} - I_{vid,b} \quad (17)$$

O investimento em vidro a partir do preço por unidade de área calcula-se,

$$I_{vid} = \text{Preço do vidro} \left(\frac{R\$}{m^2} \right) \cdot \text{Área das janelas} (m^2) \quad (18)$$

Utilizando (18) em (17),

$$dI_{vid} = I_{vid,i} - 73,9 \frac{R\$}{m^2} \cdot 6,28 m^2 \quad (19)$$

Sendo que a transmitância (τ) é uma saída direta do modelo de simulação, para calcular o investimento em vidro de uma dada alternativa ($I_{vid,i}$) criou-se a seguinte expressão em função de τ ,

$$I_{vid,i} = 464,3 \cdot \frac{1 - \tau_i}{1 - \tau_b} \quad (20)$$

Substituindo com os valores da Tabela 31, a alternativa utilizando vidro simples e película tem um custo de,

$$I_{vid,i} = 464,3 \cdot \frac{1 - 0,3346}{1 - 0,8860} = 2.710 R\$$$

Substituindo (20) em (19) chegou-se na seguinte função, dependente unicamente da transmitância, e adequada para ser ingressada no *inicialization file*,

$$dI_{vid} = 464,3 \cdot \frac{1 - \tau_i}{1 - 0,8860} - 73,9 \frac{R\$}{m^2} \cdot 6,28 m^2 \quad (21)$$

Simplificando,

$$dI_{vid} = 3.609 - 4.071 \cdot \tau_i \quad (22)$$

O custo calculado a partir de (20) não só considera o investimento inicial, mas também o custo de substituição das películas a cada 10 anos, cujo cálculo segue a continuação.

2. Diferença do custo de substituição ($dSubs$)

Na Figura 24 encontra-se o custo em películas ao longo da vida útil do projeto. O gráfico considera a inflação e que as películas são substituídas a cada 10 anos dentro de um horizonte de 50 anos (vida útil do projeto). Utilizando a equação,

$$VP = \frac{F_t}{(1 + D)^t} \quad (23)$$

para trazer os valores dos investimentos futuros em substituição de películas indicados na Figura 24 (F_t - cor laranja) ao presente (VP), obteve-se que o custo em substituição de películas solares é,

$$VP_{Subs} = dSubs = 1.255 \text{ R\$}$$

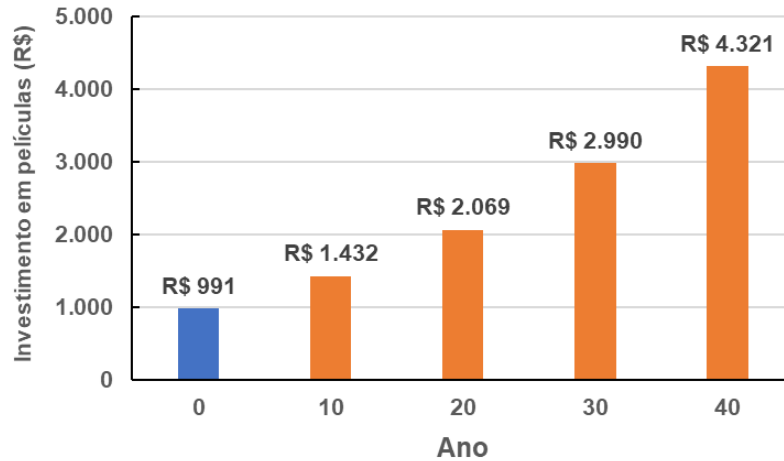


Figura 24: Custo em películas solares considerando inflação.

O investimento ao longo da vida útil de projeto na alternativa utilizando vidro simples e películas é igual à soma do investimento inicial em vidro e películas ($I_{pel+vid}$) e o custo de substituição calculado previamente ($dSubs$), deste modo,

$$I_{vid,i} = I_{pel+vid} + dSubs \quad (24)$$

$$I_{vid,i} = (157,8 + 73,9) \frac{R\$}{m^2} \cdot 6,28 m^2 + 1.256 R\$ = 2.710 R\$$$

confirmando o resultado obtido a partir de (20).

3. Diferenças do custo de energia (dE)

O custo em energia ao longo da vida útil (E) pode ser calculado a partir do consumo anual ($Cons$), a tarifa elétrica (T) e um fator de desconto para trazer as quantidades futuras ao presente (UPV^*).

$$E = Cons (kWh) \cdot T(R\$/kWh) \cdot UPV^* \quad (25)$$

UPV^* é definido como o fator de valor presente uniforme modificado (*Modified uniform Present Value*), utilizado para calcular o valor presente de quantias anuais recorrentes que mudam de ano a ano a uma taxa constante (FULLER; PETERSEN, 1996). Em (25) a quantia anual recorrente equivale a $Cons (kWh) \cdot T(R\$/kWh)$, a qual varia ano a ano a uma taxa constante correspondente ao aumento anual da tarifa de eletricidade (e). UPV^* calcula-se,

$$UPV^* = \frac{(1 + e)}{(d - e)} \left[1 - \left(\frac{1 + e}{1 + d} \right)^N \right] \quad (26)$$

Considerando a tarifa elétrica residencial e substituído em (26) os valores da Tabela 31, chega-se ao resultado,

$$UPV^* = \frac{(1 + 0,02204)}{(0,05407 - 0,02204)} \left[1 - \left(\frac{1 + 0,02204}{1 + 0,05407} \right)^{50} \right] = 25,08807$$

Uma vez que a diferença do custo de energia (dE) entre o MB (b) e uma dada alternativa (i) é determinada pela diferença de consumo, tem-se que,

$$dE = [Constot_i - Constot_b] \cdot T \cdot UPV^* \quad (27)$$

Substituído e simplificando,

$$dE = [Constot_i - Constot_b] kWh \cdot 0,79878 \frac{R\$}{kWh} \cdot 25,08807$$

$$dE = 20,04027 [Constot_i - Constot_b] \quad (28)$$

Cada ZB possui um valor particular de consumo do MB ($Constot_b$), o qual pode ser consultado na Tabela 68.

Finalmente, substituído (16), (22) e (28) em (9), o dLCC pode ser calculado a partir de uma equação que depende unicamente de variáveis disponíveis na saída do modelo de simulação, sendo esta,

$$dLCC = (39.821 \cdot esp_i - 3.982) + (3.609 - 4.071 \cdot \tau_i) + [20,04027 (Constot_i - Constot_b)] \quad (29)$$

3.7.2. Variáveis a serem otimizadas

O número ideal de variáveis independentes para um problema de otimização de edifícios ainda está sujeito a debate. Em média, os estudos de otimização utilizam 15 variáveis independentes, dependendo da complexidade do problema e a capacidade do algoritmo escolhido (NGUYEN; REITER; RIGO, 2014). Com relação ao tipo de variável, recomenda-se dar preferência às contínuas. Variáveis discretas geralmente tornam o problema de otimização não-convexo e descontínuo e, portanto, mais difícil de resolver. Na medida que mais variáveis discretas são adicionadas, a memória e custo computacional podem aumentar exponencialmente (NGUYEN; REITER; RIGO, 2014). Nos pontos que seguem explica-se a escolha das variáveis a serem otimizadas e seus respectivos intervalos de valores.

- Espessura do isolamento

Devido às diferentes orientações, cada fachada da edificação recebe diferentes incidências de radiação solar, variando conforme o horário. Por essa razão, a espessura do isolamento foi dividida em três variáveis diferentes: uma correspondente à cobertura (e_{cob}), uma correspondente às fachadas leste e norte (e_{L_N}), e uma correspondente às fachadas oeste e sul (e_{O_S}). A cobertura por ser horizontal recebe radiação continuamente; as fachadas leste e norte recebem a maior parte da radiação na manhã e tarde; e as fachadas oeste e sul recebem a maior parte da radiação na tarde e fim da tarde.

Os valores da espessura foram escolhidos respeitando as espessuras padrão disponíveis comercialmente para placas de EPS (0,65; 0,70; 0,75; 0,80; 0,85; 0,90; 0,95; 100; 110; 120; 130, etc.) (ISORECORT, 2013).

- Largura das janelas

Similarmente, a largura das janelas foi dividida em duas variáveis diferentes, uma correspondente às janelas localizadas na fachada oeste (L_jan_O) e outra correspondente às janelas localizadas na fachada leste (L_jan_L).

Os valores de largura definidos respeitam a largura padrão de janelas de alumínio, descontando a espessura da caixilharia de 0,0572 mm.

- Inclinação dos brises horizontais

Novamente, a inclinação dos brises foi dividida em duas variáveis, uma correspondente aos brises das janelas localizadas na fachada oeste (Ang_bh_O) e outra correspondente aos brises das janelas localizadas na fachada leste (Ang_bh_L).

Quanto aos valores, foi considerada uma faixa de inclinação que não compromettesse o visual.

- Tipo de vidro (com ou sem película solar)

Devido à energia necessária para aquecimento ser bem inferior a energia necessária para refrigeração (ver seção 4.1), o foco das películas de controle solar deve ser evitar o ganho de calor durante o verão. A partir da carta solar da Figura 25, considerando a altura e azimute solar, pode-se ter uma ideia da insolação em cada fachada. Observa-se que as fachadas leste e oeste recebem muita radiação solar no verão; contudo a fachada oeste recebe na parte da tarde, quando as temperaturas são mais altas. A fachada sul, ganha no começo da manhã e no fim da tarde só até o mês de março. A fachada norte recebe bastante insolação, porém nos meses mais quentes do ano permanece sombreada quando a altura solar é baixa o suficiente para penetrar as janelas. A partir desta análise, e ao alto custo inicial, escolheu-se incorporar na otimização somente películas de controle solar nas janelas da fachada oeste.

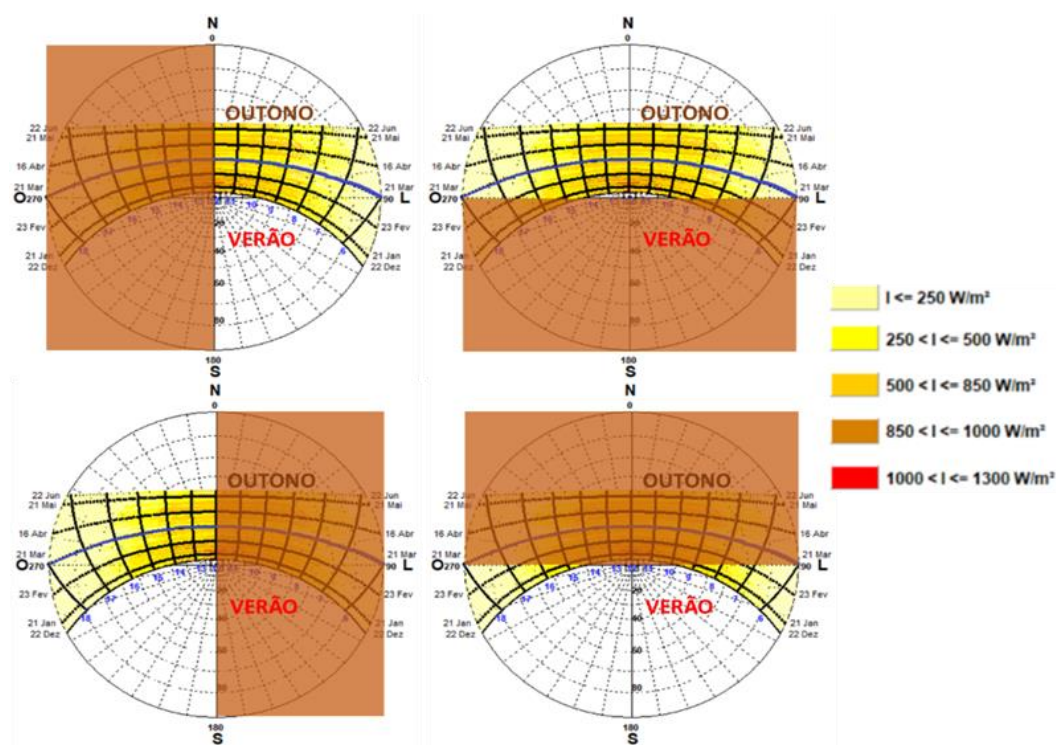


Figura 25: Carta solar de Florianópolis contendo a radiação global de 22 de dezembro a 21 de junho.

Fonte: Elaborado pelo autor a partir do programa SOL-AR 6.2.

A película de controle solar escolhida é da marca 3M, suas características encontram-se na Tabela 32. A escolha foi realizada considerando a disponibilidade no Brasil, a confiabilidade da marca e preço. O modelo selecionado foi o *neutral*, por ser o mais econômico e apresentar boa relação entre passagem de luz natural e redução de calor (3M, 2012).

Tabela 32: Características da película de controle solar escolhida vs. vidro simples.

Fonte: Lawrence Lab. (2019)

Modelo	Clear cod. 11501 – J1	Neutral 35 cod. 2716 - J2
d (mm) - espessura	3.84	-
SHGC - solar heat gain coefficient	0.883	0.457
SC – shading coefficient	1.015	0.525
Tsol – transmitância solar	0.866	0.306936
Rfsol – refletância solar frontal	0.077	0.1871686
Rbsol – refletância solar posterior	0.77	0.194952
Tvis - transmitância visível	0.906	0.362282
Rfvis - refletância visível frontal	0.082	0.199595
Rbvis - refletância visível posterior	0.802	0.179056
λ (W/m K) - condutividade	1	0.95

- Orientação

Foi considerada a rotação total da edificação a cada 60°.

- Transmitância das cortinas

Foram consideradas as transmitâncias padrão dos elementos de sombreamento internos disponíveis nos *dataset* do EnergyPlus (baixa, média e alta).

- *Setpoint* das cortinas

Como visto na seção 493.3.2, no MB foi considerado que as cortinas estão ativas quando a radiação incidente excede os 50 W/m². Dado que durante os períodos quentes a tendência é fechar as cortinas e nos períodos frios abri-las; na fase de otimização considerou-se não só que as cortinas são ativadas quando a radiação excede 50 w/m², mas também quando simultaneamente a temperatura do ar exterior excede um ponto de ajuste estabelecido (*setpoint* - °C). Desse modo, por exemplo, se em um dia frio de inverno a radiação incidente sobre uma janela é maior do que 50 W/m², mas a temperatura exterior ambiente é baixa, o suficiente para não exceder o ponto de ajuste, a cortina permanecera aberta. Para estabelecer qual é o ponto de ajuste ótimo, ele foi definido como uma variável da otimização, denominada *set_temp*.

- Renovações de ar

Para a taxa de renovação de ar foi considerado o intervalo de 1 a 5 ren/h, conforme sugere o procedimento de simulação de desempenho térmico da norma NBR 15.575-1.

- Absortância da envoltura

Foi considerado o intervalo de 0,2 a 0,4. O mínimo de 0,2 foi estabelecido conforme a NBR 15.220-2, correspondente a pintura branca. O máximo foi determinado em base aos resultados da Tabela 19, sendo que $\alpha = 0,3$ cumpre os requisitos da NBR 15.575 e $\alpha = 0,5$, não os cumpre; tomou-se a média de ambos valores como limite máximo.

Considerando os pontos anteriores chegou-se na Tabela 33, onde se encontram as variáveis independentes a serem otimizadas e os valores de cada campo necessário de ser preenchido no *command file*. Cabe salientar que para chegar nesse conjunto final de variáveis de entrada, foram rodadas várias otimizações

considerando diferentes agrupações de variáveis. O grupo de variáveis da Tabela 33 corresponde ao que proporcionou a maior redução da diferença do custo do ciclo de vida (dLCC) entre os grupos testados.

Tabela 33: Variáveis independentes a serem otimizadas

Variável	Descrição	Tipo	Min.	Máx.	Degrau	Início	Opções
1. e_cob	Esp. do isolamento (cm)	Cont.	0,07	0,15	0,02	0,1	
2. e_N_L	Esp. do isolamento (cm)	Cont.	0,07	0,15	0,02	0,1	
3. e_S_O	Esp. do isolamento (cm)	Cont.	0,07	0,15	0,02	0,1	
4. L_jan_O	Largura das janelas (m)	Cont.	1,09	1,89	0,2	1,89	
5. L_jan_L	Largura das janelas (m)	Cont.	1,09	1,89	0,2	1,89	
6. Ang_bh_O	Inclinação dos brises horizontais (°)	Cont.	90	120	10	90	
7. Ang_bh_L	Inclinação dos brises horizontais (°)	Cont.	90	120	10	90	
8. tv_tau	Tipo de vidro/transmitância	Discr.	0,335*	0,886*	0,184*	op. 1	J1 J2
9. Azim	Orientação (°)	Cont.	0	360	60	0	
10. tau	Transmitância cortinas (-)	Discr.	0,1*	0,7*	0,1*	op. 3	0,1 0,3 0,4 0,7
11. set_temp	Setpoint das cortinas (°C)	Cont.	15	23	2	15	
12. ACH	Renovações de ar (ren/h)	Cont.	1	5	1	1	
13. abs	Absortância da envoltura	Cont.	0,2	0,4	0,1	0,3	

*Valores estimados para ingressar as variáveis discretas como contínuas no teste dos algoritmos.

3.7.3. Algoritmos

Não existe uma regra genérica para a seleção do algoritmo, isto é inviável devido à complexidade e diversidade dos problemas de OBS. Consequentemente, a seleção e configuração de algoritmos pode envolver tentativa e erro (NGUYEN; REITER; RIGO, 2014). Em vista disso, a otimização correspondente à ZB3 foi rodada 8 vezes, utilizando cada um dos diferentes tipos de algoritmos da Tabela 34, todos eles disponíveis na biblioteca do GenOpt (WETTER, 2008).

Tabela 34: Algoritmos para otimização multidimensional disponíveis no GenOpt
Fonte: Wetter (2008)

	Nome	Tipo de busca	Tipo de variável
1. GPSHookeJeeves	<i>Hooke-Jeeves</i>	Determinista – <i>direct search</i>	Contínuas
2. NelderMeadONeill	<i>Simplex Algorithm of Nelder and Mead</i>		
3. DiscreteArmijoGradient	<i>Discrete Armijo Gradient</i>	Determinista – <i>gradient-based</i>	
4. PSOIWMixed	<i>Particle Swarm Optimization with inertia weight</i>	Baseada em população	Contínuas e discretas
5. PSOCCMixed	<i>Particle Swarm Optimization with constriction coefficient</i>		
6. PSOCCMeshMixed	<i>Particle Swarm Optimization with constriction coefficient and continuous independent variables restricted to a mesh</i>		
7. GPSPSOCCHJMixed	<i>Hybrid Generalized Pattern Search Algorithm with Particle Swarm Optimization Algorithm</i>	Híbrida	Contínuas e discretas
8. GPSPSOCCHJReal	<i>Hybrid Generalized Pattern Search Algorithm with Particle Swarm Optimization Algorithm</i>		Contínuas

As otimizações foram executadas utilizando a configuração *default* de cada um dos algoritmos, contida na biblioteca do GenOpt. Para aqueles algoritmos que aceitam só variáveis contínuas, as variáveis discretas foram aproximadas a contínuas usando os valores marcados com (*) da Tabela 33. Os resultados de esta etapa de seleção do algoritmo são apresentados na seção 4.2.1. A partir da análise chegou-se à decisão de utilizar o N° 7, GPSPSOCCHJMixed.

3.8. VERIFICAÇÃO DA VENTILAÇÃO NATURAL

A taxa de renovação de ar (ACH) é uma medida do desempenho da ventilação natural. A ventilação natural através das janelas se deve ao efeito do vento e da convecção natural, a qual ocorre quando a temperatura interna é mais alta que a externa, fazendo com que o ar frio entre na parte inferior e o ar quente saia na parte superior da abertura. A modelagem empírica desse fenômeno foi concebida por Gidds e Phaff, através da seguinte equação (SANTAMOURIS, 2014):

$$ACH = \frac{1}{2} \cdot \frac{3600}{V} \cdot A_w \cdot \sqrt{0,001 V_w^2 + 0,0035 H \Delta T + 0,01} \quad (30)$$

Onde,

V = volume do ambiente (m^3);

A_w = área necessária de abertura (m^2);

V_w = velocidade média do vento (m/s);

H = altura da abertura;

ΔT = diferença de temperatura média entre interior e exterior ($^{\circ}C$).

A presente etapa visa comprovar que porcentagem da abertura precisa manter-se aberto (*% aberto*) para proporcionar a taxa de ventilação natural ótima achada através do processo de otimização em cada ZB. Para esse fim, foi empregada a equação (30), do seguinte modo:

$$\% \text{ aberto} = \frac{A_w}{A} \cdot 100 = \frac{\left(\frac{ACH \cdot 2 \cdot V}{3600 \cdot \sqrt{0,001 V_w^2 + 0,0035 H \Delta T + 0,01}} \right)}{A} \cdot 100 \quad (31)$$

Onde, A = área real da abertura (m^2).

Antes de calcular a porcentagem de abertura, são esclarecidas as premissas com relação à renovação de ar adotadas no modelo. Primeiramente, considera-se que a taxa de renovação de ar pode ser maior do que 1ren/h quando o ar condicionado encontra-se desligado, quer dizer, durante as horas em que o ambiente permanece desocupado (Figura 17). Adicionalmente, a partir da Figura 26 foram limitados os períodos do ano em que a ventilação natural é permitida, com base na temperatura média mensal por ZB. Como visto, nas zonas bioclimáticas mais frias (verde), durante o período de março a novembro, a temperatura média mensal encontra-se aproximadamente por debaixo dos 20 $^{\circ}C$ (marcadores verde escuro). Portanto, foi considerado que durante esse período as janelas permanecem a maior parte do tempo fechadas e que a renovação de ar não pode ser maior do que 1ren/h.

Do mesmo modo, nas zonas bioclimáticas 3, 4 e 5 (laranja) a temperatura permanece por debaixo dos 20 $^{\circ}C$ no período de junho a agosto (vermelho), conseqüentemente, nesse lapso a renovação de ar não pode ser mais do que 1ren/h. As zonas mais

quentes (azul) apresentam temperaturas médias mensais sempre maiores do que 20 °C e, portanto, a ventilação natural é permitida o ano inteiro. Resumindo o dito, o *schedule* da Figura 27 mostra os períodos do ano em que a ventilação natural é considerada (aberto) em cada ZB.

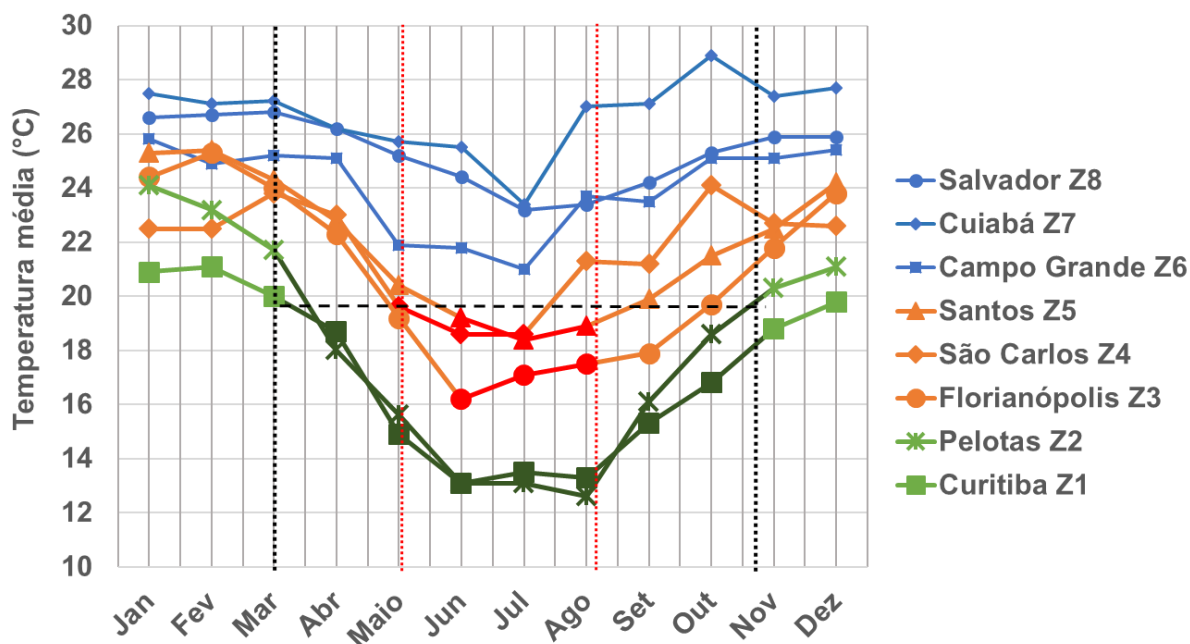


Figura 26: Temperaturas médias mensais e limites dos *schedules* das aberturas.

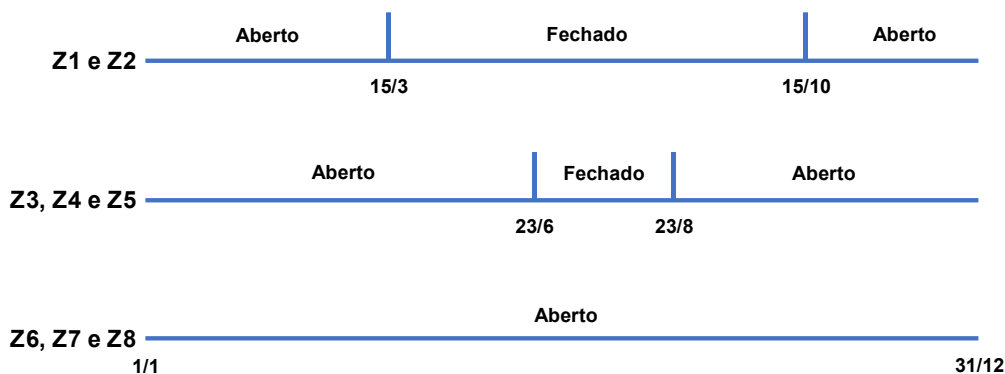


Figura 27: *Schedule* anual das aberturas.

3.8.1. Variáveis para o cálculo da porcentagem de abertura

Na Tabela 35 encontram-se os valores das variáveis independentes resultantes da otimização, necessárias para o cálculo da % *aberto*. As zonas bioclimáticas para as quais aplica o cálculo de % *aberto* são aquelas que deram por resultado taxas de renovação de ar maior do que 1ren/h, no caso: 3, 4, 5, 6, 7 e 8.

Tabela 35: Variáveis resultantes da otimização necessárias no cálculo de % aberto

Zona bioclimática	ZB1	ZB2	ZB3	ZB4	ZB5	ZB6	ZB7	ZB8
I_jan_O (m); MB = 1,89 m	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09
I_jan_L (m); MB = 1,89 m	1,09	1,09	1,20	1,89	1,87	1,89	1,89	1,89
azim (°); MB = 0°	303,75	285	93,8	86,3	86,3	86,3	86,3	86,3
ACH (ren/h); MB = 1 ren/h	1	1	5	5	5	5	5	5

Os pontos cardinais em graus correspondem a: N = 0°, L = 90°, S = 180° e O = 270°. Como mostra a Tabela 35, para as zonas bioclimáticas 3 a 8 a variável azim otimizada corresponde a uma rotação de aproximadamente 90°. Então, a orientação das aberturas da casa otimizada ficam:

- Janela Leste (Z4) → 90° + Azim (90°) = 180° = **Janela Sul**;
- Porta Sul (Z1 + Z5) → 180° + Azim (90°) = 270° = **Porta Oeste**;
- Janela Oeste (Z2 e Z1 + Z5) → 270° + Azim (90°) = 360° = **Janela Norte**.

A Tabela 36 contém as variáveis necessárias para o cálculo de % *aberto* que não mudam conforme a ZB.

Tabela 36: Variáveis para o cálculo de %aberto constantes

Ambiente da casa	V (m³)	Abertura para ventilação	Após otimização	H (m)	Ocupação
Z1 + Z5	71,11	Porta S ou janela O	Porta O ou Janela N	2,45 ou 1,09	21 - 9 hs
Z2	33,26	Janela O	Janela Norte	1,09	9 - 21 hs

Nas Tabela 37 e Tabela 38 encontram-se as variáveis climáticas que mudam conforme a zona bioclimática. A Tabela 37 mostra a velocidade predominante do vento na direção da orientação das aberturas. A Tabela 38 contém a média calculada a partir da temperatura externa horária mensal dos arquivos climáticos para os dois períodos de ocupação definidos na Tabela 36. Juntamente, contém a média da temperatura interior (Tint) de cada ambiente da edificação, calculada a partir do arquivo de saída da simulação do modelo otimizado, para o respectivo período de ocupação de cada cômodo. Em outras palavras, a Tint dos ambientes Z1 e Z5 corresponde à média das temperaturas horárias compreendidas no período das 21 às 9hs; enquanto que a Tint dos ambientes Z2 e Z4 corresponde à média das temperaturas horárias compreendidas no período das 9 às 21hs.

Tabela 37: Velocidades predominantes do vento (Vw)
 Fonte: Analysis-SOL-AR 6.2. e arquivos climáticos (DOE; BTO; NREL, 2019)

		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
ZB3	Vw (m/s) Sul	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	Vw (m/s) Oeste	3	3	3	3	3	3	1	1	1	3	3	3
	Vw (m/s) Norte	3	3	3	3	3	3	3	3	3	6	6	6
ZB4	Vw (m/s) Sul	2,9	2,6	2,5	2,1	2	2	1,8	2	2,9	2,1	3	3
	Vw (m/s) Oeste	2,9	2,6	2,5	2,1	2	2	1,8	2	2,9	2,1	3	3
	Vw (m/s) Norte	2,9	2,6	2,5	2,1	2	2	1,8	2	2,9	2,1	3	3
ZB5	Vw (m/s) Sul	2,5	2,2	2,1	2,1	2,1	2,1	1,3	1,4	2,4	1,7	2,4	2,1
	Vw (m/s) Oeste	2,5	2,2	2,1	2,1	2,1	2,1	1,3	1,4	2,4	1,7	2,4	2,1
	Vw (m/s) Norte	2,5	2,2	2,1	2,1	2,1	2,1	1,3	1,4	2,4	1,7	2,4	2,1
ZB6	Vw (m/s) Sul	4,8	3,4	3,7	3,4	3,7	4,2	5,1	2,9	4,4	3,9	3,7	3,3
	Vw (m/s) Oeste	4,8	3,4	3,7	0	3,7	4,2	0	2,9	4,4	3,9	3,7	3,3
	Vw (m/s) Norte	4,8	3,4	3,7	3,4	3,7	4,2	5,1	2,9	4,4	3,9	3,7	3,3
ZB7	Vw (m/s) Sul	2,6	2,5	1,8	2,2	1,7	1,3	1,8	2,2	2,1	2,2	2	2,1
	Vw (m/s) Oeste	2,6	2,5	1,8	2,2	1,7	1,3	1,8	0	2,1	2,2	0	2,1
	Vw (m/s) Norte	2,6	2,5	1,8	2,2	1,7	1,3	1,8	2,2	2,1	2,2	2	2,1
ZB8	Vw (m/s) Sul	4,1	3,3	3,6	2,7	2,8	3,4	3,2	3,5	3,8	4,6	4,5	3,9
	Vw (m/s) Oeste	0	0	3,6	2,7	2,8	3,4	3,2	0	0	0	0	0
	Vw (m/s) Norte	4,1	3,3	3,6	2,7	2,8	3,4	3,2	3,5	3,8	4,6	4,5	3,9

Tabela 38: Temperaturas médias interior e exterior
 Fonte: Arquivos climáticos da base SWERA (DOE; BTO; NREL, 2019)

		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
ZB3	Text (°C) 9 - 21 hs	25,9	26,8	25,6	23,7	21,0	18,0	18,5	19,0	19,6	21,1	23,5	25,2
	Text (°C) 21 - 9 hs	22,9	23,8	22,3	20,9	17,5	14,4	15,7	16,0	16,2	18,3	20,0	22,3
	Tint (°C) Z1 e Z5	22,6	24,9	24,0	21,9	21,8	19,3	17,4	17,1	16,0	19,9	20,8	22,2
	Tint (°C) Z2	24,2	27,1	26,7	25,3	25,7	20,5	19,9	20,8	17,1	22,2	24,5	23,7
	Tint (°C) Z4	24,3	27,1	26,7	25,2	25,5	20,2	19,6	20,2	17,1	22,2	24,5	23,8
ZB4	Text (°C) 9 - 21 hs	23,5	23,5	25,0	27,7	22,7	19,5	17,7	27,5	26,8	26,1	26,8	22,3
	Text (°C) 21 - 9 hs	19,8	20,9	22,2	20,9	17,4	13,9	16,5	20,5	20,5	21,2	23,1	20,7
	Tint (°C) Z1 e Z5	20,9	21,8	23,0	21,6	18,5	15,7	18,2	21,1	20,6	21,8	23,3	21,7
	Tint (°C) Z2	24,2	24,1	25,3	27,3	23,2	21,0	21,1	25,5	26,1	25,9	26,5	23,1
	Tint (°C) Z4	24,3	24,2	25,4	27,2	23,0	20,7	20,9	25,3	26,1	26,0	26,6	23,3
ZB5	Text (°C) 9 - 21 hs	26,2	28,9	26,4	20,7	24,6	22,7	21,6	19,7	21,5	26,6	24,0	25,4
	Text (°C) 21 - 9 hs	21,7	23,7	22,5	17,8	18,4	19,4	15,7	16,4	18,1	16,8	21,6	18,9
	Tint (°C) Z1 e Z5	22,8	24,2	23,0	19,0	19,1	19,5	17,9	18,2	19,1	18,5	22,3	20,6
	Tint (°C) Z2	26,5	28,4	26,3	21,5	24,4	22,8	22,2	21,2	21,9	26,4	24,1	25,8
	Tint (°C) Z4	26,6	28,5	26,4	21,6	24,3	22,7	21,9	21,3	21,9	26,5	24,2	25,9
ZB6	Text (°C) 9 - 21 hs	28,2	27,6	26,5	18,2	26,1	21,4	23,4	28,8	30,9	25,7	30,6	31,4
	Text (°C) 21 - 9 hs	22,9	24,5	22,0	19,9	20,8	21,8	16,9	21,8	25,0	20,9	24,5	25,8
	Tint (°C) Z1 e Z5	23,7	24,8	22,5	21,0	21,2	22,4	18,0	22,6	24,8	22,0	25,0	26,1
	Tint (°C) Z2	27,8	27,5	26,5	20,4	25,8	22,5	23,6	27,5	29,4	25,8	29,4	30,1
	Tint (°C) Z4	28,0	27,7	26,6	20,5	25,7	22,5	23,5	27,5	29,5	25,9	29,6	30,3
ZB7	Text (°C) 9 - 21 hs	28,4	27,6	29,4	29,6	26,9	29,2	24,2	34,6	33,1	34,7	28,4	28,8
	Text (°C) 21 - 9 hs	25,6	24,8	25,2	23,9	20,9	21,6	18,9	26,4	27,9	28,0	23,8	26,4
	Tint (°C) Z1 e Z5	26,1	25,6	25,8	24,5	22,3	22,4	20,1	26,2	27,8	27,5	24,5	26,8
	Tint (°C) Z2	28,5	27,9	29,1	29,2	26,7	28,3	24,6	32,0	31,1	32,5	28,0	28,6
	Tint (°C) Z4	28,6	28,0	29,2	29,1	26,5	28,1	24,4	32,0	31,2	32,7	28,2	28,8
ZB8	Text (°C) 9 - 21 hs	29,3	29,1	24,2	23,0	17,3	17,0	15,6	15,0	21,2	21,6	23,7	24,0
	Text (°C) 21 - 9 hs	25,0	19,6	19,6	13,2	15,8	14,6	15,7	11,5	16,5	15,0	13,0	21,7
	Tint (°C) Z1 e Z5	25,1	21,3	21,1	15,7	17,9	16,7	17,1	14,0	17,9	17,1	15,5	22,6
	Tint (°C) Z2	28,8	28,9	25,2	24,2	19,5	19,8	18,2	18,0	22,3	22,3	24,4	24,7
	Tint (°C) Z4	28,9	29,0	25,2	24,0	19,6	19,4	18,1	17,9	22,2	22,4	24,5	24,8

3.8.2. Exemplo de cálculo para a zona bioclimática 8

A modo de exemplo, para a ZB8, para o mês de janeiro e para a janela Sul (antes da otimização jan_L) localizada no ambiente da casa Z4; tem-se:

- A partir da Tabela 35, a taxa de renovação de ar otimizada, $ACH = 5 \text{ ren/h}$;
- A partir da Tabela 36, o volume do ambiente Z4, $V = 33,26\text{m}^3$ e a altura da janela, $H = 1,09\text{m}$;
- A partir da Tabela 37, o vento na direção S para a ZB8 em janeiro, $V_w = 4,1\text{m/s}$;
- A partir da Tabela 38, a temperatura média interior do ambiente Z4 correspondente ao período das 9-21hs em janeiro, $T_{int} = 28,9^\circ\text{C}$ e a temperatura média exterior do mesmo período, $T_{ext} = 29,3^\circ\text{C}$. Portanto, $\Delta T = T_{int} - T_{ext} = 28,9 - 29,3 = -0,4^\circ\text{C}$;
- A partir das Tabela 35 e Tabela 36, $A_{jans} = l_{jan_L} \cdot H = 1,89 \cdot 1,09\text{m} = 2,06\text{m}^2$.

Substituindo os valores em (31),

$$\% \text{ aberto} = \frac{\left(\frac{5 \text{ ren/h} \cdot 2 \cdot 33,26\text{m}^2}{3600 \sqrt{0,001 \cdot \left(\frac{4,1\text{m}}{\text{s}}\right)^2 + 0,0035 \cdot 1,09\text{m} \cdot -0,4^\circ\text{C} + 0,01}} \right)}{2,06\text{m}^2} \cdot 100 = \mathbf{28\%}$$

Na Tabela 39 encontra-se o resumo de este procedimento, aplicado para todas as aberturas e meses do ano do modelo de casa otimizado para a ZB8. Para janelas e portas de correr, a porcentagem de abertura para ventilação natural é 50% da área. Consequentemente, se $\% \text{aberto} > 50\%$, não é possível manter a taxa de ventilação natural igual a 5 ren/h. Na Tabela 39, os campos em que $\% \text{aberto}$ é maior do que 50% foram destacados em negrito itálico, indicando que não é possível manter a taxa de ventilação igual a 5 ren/h através da respectiva abertura, no mês correspondente. Observa-se que a área da janela N não é suficiente para manter a ventilação dos ambientes da casa Z1 + Z5 em nenhum dos meses do ano. No entanto, se utilizada a porta O como abertura para ventilação dos ambientes 1 e 5, a taxa igual a 5ren/h pode ser mantida o ano inteiro.

Tabela 39: Cálculo do %aberto para a zona bioclimática 8

ZB8	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
ACH	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
V (m³) - Z1 + Z5	71,1	71,1	71,1	71,1	71,1	71,1	71,1	71,1	71,1	71,1	71,1	71,1
V (m³) - Z2 ou Z4	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3
H (m) porta	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45
H (m) janelas	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09
A (m²) porta O (Z1 + Z5)	5,32	5,32	5,32	5,32	5,32	5,32	5,32	5,32	5,32	5,32	5,32	5,32
A (m²) janelas N (Z2 ou Z1 + Z5)	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18
A (m²) janela S (Z4)	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05
Text (°C) 9 - 21 hs	29,3	29,1	24,2	23,0	17,3	17,0	15,6	15,0	21,2	21,6	23,7	24,0
Text (°C) 21 - 9 hs	25,0	19,6	19,6	13,2	15,8	14,6	15,7	11,5	16,5	15,0	13,0	21,7
Tint (°C) Z1 e Z5	25,1	21,3	21,1	15,7	17,9	16,7	17,1	14,0	17,9	17,1	15,5	22,6
Tint (°C) Z2	28,8	28,9	25,2	24,2	19,5	19,8	18,2	18,0	22,3	22,3	24,4	24,7
Tint (°C) Z4	28,9	29,0	25,2	24,0	19,6	19,4	18,1	17,9	22,2	22,4	24,5	24,8
ΔT (°C) Z1 e Z5	0,10	1,70	1,54	2,55	2,07	2,11	1,40	2,55	1,44	2,07	2,49	0,94
ΔT (°C) Z2	-0,55	-0,20	1,02	1,17	2,19	2,74	2,55	3,01	1,16	0,66	0,72	0,65
ΔT (°C) Z4	-0,40	-0,12	1,05	0,97	2,27	2,42	2,46	2,99	1,09	0,78	0,85	0,77
Vw (m/s) Sul	4,1	3,3	3,6	2,7	2,8	3,4	3,2	3,5	3,8	4,6	4,5	3,9
Vw (m/s) Oeste	0	0	3,6	2,7	2,8	3,4	3,2	0	0	0	0	0
Vw (m/s) Norte	4,1	3,3	3,6	2,7	2,8	3,4	3,2	3,5	3,8	4,6	4,5	3,9
Aw (m²) porta O (Z1 + Z5)	1,89	1,26	1,04	1,00	1,05	0,99	1,10	1,11	1,32	1,19	1,11	1,47
Aw (m²) janela N (Z1 + Z5)	1,20	1,19	1,16	1,20	1,23	1,15	1,24	1,11	1,14	1,00	0,99	1,16
Aw (m²) janela S (Z4)	0,58	0,65	0,56	0,64	0,57	0,53	0,54	0,50	0,55	0,50	0,50	0,55
Aw (m²) janela N (Z2)	0,59	0,65	0,56	0,63	0,57	0,52	0,53	0,50	0,54	0,50	0,51	0,56
%aberto, porta O (Z1 + Z5)	36%	24%	20%	19%	20%	19%	21%	21%	25%	22%	21%	28%
%aberto, janela N (Z1 + Z5)	101%	101%	98%	102%	104%	97%	104%	93%	97%	84%	84%	98%
%aberto, janela S (Z4)	28%	32%	27%	31%	28%	26%	26%	25%	27%	24%	25%	27%
%aberto, janela N (Z2)	50%	55%	48%	53%	48%	44%	45%	43%	46%	43%	43%	47%

O mesmo procedimento foi efetuado para todas as zonas bioclimáticas pertinentes (3 a 8), e os resultados encontram-se na seção 4.2.3. Para aqueles meses do ano em que, em determinado ambiente da casa não é possível manter uma taxa de renovação de ar igual 5ren/h, devido à área de abertura ser insuficiente; a renovação de ar do modelo de edificação otimizado foi corrigida e substituída por 1ren/h. Por exemplo, para a ZB8 o resultado da Tabela 39 aponta que nos meses de fevereiro e abril, não é possível manter a taxa de 5ren/h já que %aberto>50%. Por conseguinte, a taxa de renovação de ar do modelo de edificação otimizado para a ZB8, para o ambiente da casa Z2 e para os meses fevereiro e abril, foi corrigida, passando de 5ren/h a 1ren/h.

Desse mesmo modo, o modelo de simulação otimizado de cada uma das zonas bioclimáticas que aplicam, foi retificado e os novos resultados (MO_{ACH}) encontram-se disponíveis na seção 4.2.3.

3.9. AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO

A avaliação do conforto térmico do modelo de edificação otimizado (MO_{ACH}) foi realizada através dos modelos de Fanger e adaptativo, descritos previamente na seção 2.3.3 da revisão bibliográfica. Para o cálculo das horas de desconforto térmico, foi necessário definir as seguintes variáveis no modelo de simulação:

- Velocidade do ar: 0,1m/s;
- Taxa de liberação de calor por pessoa: 115 W, correspondente a um indivíduo realizando trabalho leve;
- Vestimenta: *Dynamic clothing model*.

Na maioria das simulações de energia de edifícios, a condição de conforto térmico é calculada com base no pressuposto de que o isolamento da roupa é igual a um valor constante de 0,5 clo durante a estação de fria e 1,0 clo durante a estação quente. Geralmente esses dois valores são usados e a mudança de 0,5 para 1 ou vice-versa é feita repentinamente de um dia para outro. Essa suposição simplificada pode levar à avaliação incorreta das condições de conforto. Na realidade, os ocupantes frequentemente ajustam suas roupas, dependendo das condições térmicas ao seu redor, em oposição à suposição de valores constantes. Para superar essa limitação, no presente trabalho foi utilizado o modelo de roupas dinâmico (*dynamic clothing model*) proposto na ASHRAE 55 e definido a continuação (DOE, 2018). Na Figura 28 o mesmo modelo é ilustrado de forma gráfica.

$$\text{Para } t_{a(out,6)} < -5^{\circ}\text{C} \rightarrow I_{cl} = 1.0 \quad (32)$$

$$\text{Para } -5^{\circ}\text{C} \leq t_{a(out,6)} < 5^{\circ}\text{C} \rightarrow I_{cl} = 0,818 - 0,0364 \cdot t_{a(out,6)} \quad (33)$$

$$\text{Para } 5^{\circ}\text{C} \leq t_{a(out,6)} < 26^{\circ}\text{C} \rightarrow I_{cl} = 10^{(-0,1635 - 0,0066 \cdot t_{a(out,6)})} \quad (34)$$

$$\text{Para } t_{a(out,6)} \geq 26^{\circ}\text{C} \rightarrow I_{cl} = 0,46 \quad (35)$$

Onde,

I_{cl} = valor do isolamento da roupa na unidade clo ($1\text{clo} = 0,155 \text{ m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$);

$t_{a(out,6)}$ = temperatura do ar externo medida às 6 horas da manhã.

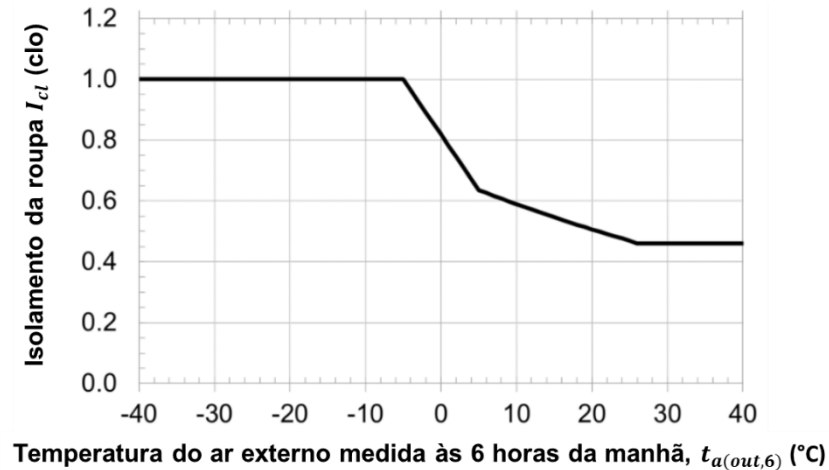


Figura 28: Representação gráfica do modelo de isolamento de roupas proposto.
Fonte: DOE (2018).

3.9.1. Cálculo do consumo do modelo otimizado com conforto (MOC)

De acordo com o modelo adaptativo, devido à diminuição gradual da resposta do organismo a estímulos ambientais repetidos, os ocupantes podem sentir o calor como sendo menos severo do que o PMV prevê. Como resultado, em um edifício projetado de acordo com as faixas de conforto sugeridas pelo modelo de conforto adaptativo, os ocupantes sentem-se confortáveis durante mais tempo e consequentemente é previsto um consumo menor de energia em condicionamento de ar.

Para quantificar a poupança em energia resultante do emprego do modelo adaptativo, a edificação foi simulada utilizando o controle do termostato baseado na temperatura operativa (*ZoneControl:Thermostat:OperativeTemperature*). Desta forma, a programação da temperatura do ponto de ajuste do termostato para resfriamento do espaço (Tabela 26) é substituída pela temperatura operacional calculada com base nos limites de aceitabilidade definidos na ASHRAE 55 (DOE, 2016). Esses limites de aceitabilidade encontram-se ilustrados na Figura 29, onde a primeira linha superior corresponde à classe 80% ($\text{Top} + 2,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$), a segunda linha superior à classe 90% ($\text{Top} + 3,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$) e a linha central é igual a Top.

Para o cálculo do consumo energético do MOC, o ponto de ajuste do termostato foi gerado a partir da linha central do modelo, nomeada no manual do EnergyPlus como *AdaptiveASH55CentralLine*. Os novos valores de consumo encontram-se disponíveis nos resultados, seção 4.3.1.

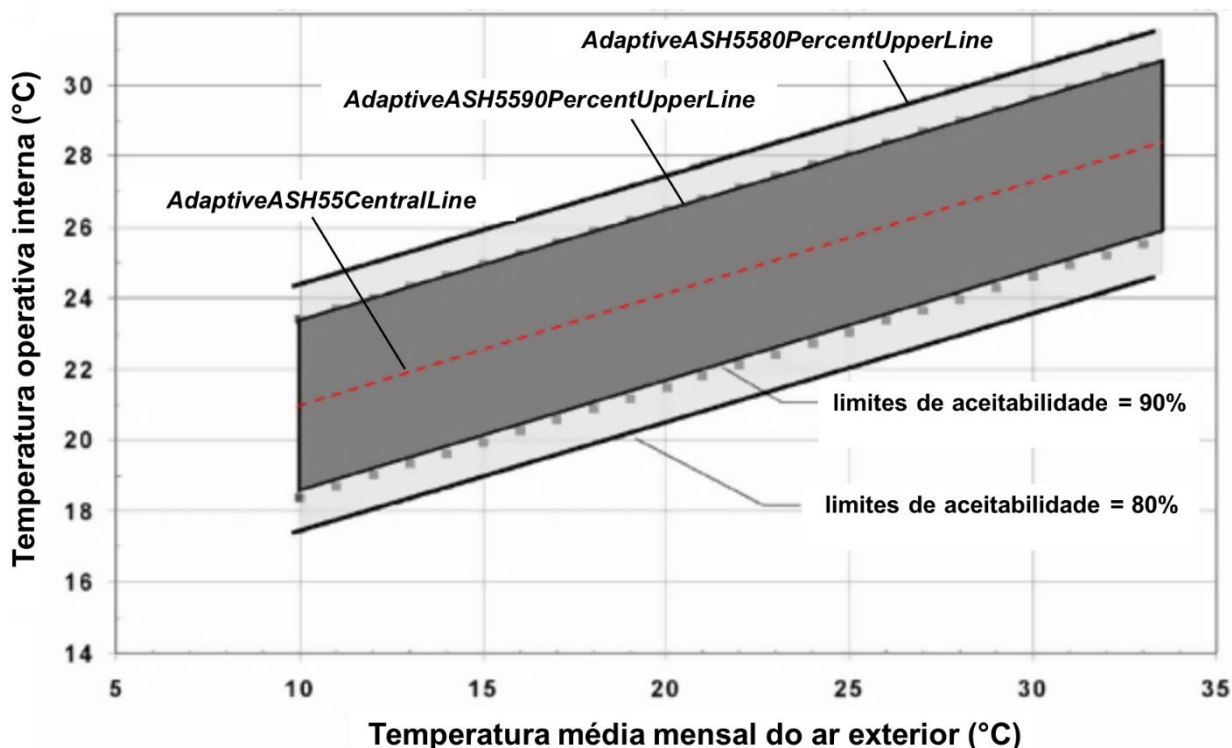


Figura 29: Limites de aceitabilidade da temperatura operacional definidos na ASHRAE 55.

Fonte: DOE (2018).

Cabe mencionar que o modelo de conforto adaptativo é aplicável apenas quando a temperatura média do ar externo nos últimos 30 dias está entre os 10,0 e os 33,5 °C. Portanto, se a média da temperatura exterior dos últimos 30 dias estiver fora desses limites, a programação do termostato continuará sendo a definida na Tabela 26 e não a correspondente à linha central do modelo de conforto adaptativo.

3.10. CÁLCULO DO SISTEMA DE AQUECIMENTO DE ÁGUA SOLAR (SAS)

O SAS foi dimensionado manualmente, de acordo com a norma NBR 15569 e mediante simulação, utilizando o programa *System Advisor Model* (SAM).

3.10.1. Metodologia manual: NBR15569

O dimensionamento manual indicado na NBR 15569 inclui as seguintes etapas de cálculo (ABNT, 2008a):

- Consumo de AQS

$$V_{cons} = \sum (Q_{pu} \cdot T_u \cdot \text{frequência de uso}) \quad (36)$$

Onde,

V_{cons} = volume total de AQS consumido diariamente (m³);

Q_{pu} = vazão da peça de utilização (m³/s);

T_u = tempo médio de uso diário da peça de utilização (s);

frequência de uso = número total de utilizações da peça por dia.

Para uma casa com 4 moradores, adotando os valores de consumo de AQS sugeridos no anexo C da NBR 15569, a demanda diária de AQS deu por resultado 328L/dia, como indica a Tabela 40.

Tabela 40: Consumo de água quente sanitária

	Temperatura de consumo (°C)	Q_{pu} (m³)	T_u (s)	Frequência de uso	$V_{consumo}$ (m³)
Ducha	39-40	0,000117	600	4	0,28
Pia cozinha	39-40	0,000067	180	4	0,048
					0,328

- Volume do sistema de armazenamento

$$V_{armaz} = \frac{V_{cons} \cdot (T_{cons} - T_{amb})}{(T_{armaz} - T_{amb})} \quad (37)$$

Onde,

V_{armaz} = volume do sistema de armazenamento do SAS (m³). Sugere-se que $V_{armaz} \geq 75\% V_{cons}$;

T_{cons} = temperatura de consumo de utilização (°C);

T_{armaz} = temperatura de armazenamento da água (°C). Sugere-se que $T_{armaz} \geq T_{cons}$;

T_{amb} = temperatura ambiente média anual do local de instalação.

Considerando $T_{\text{cons}} = 40^{\circ}\text{C}$ e $T_{\text{armaz}} = 45^{\circ}\text{C}$, foram obtidos os resultados do volume de armazenamento da Tabela 41.

Tabela 41: Volume de armazenamento
Fonte dos dados de temperatura: (DOE; BTO; NREL, 2019)

	ZB1	ZB2	ZB3	ZB4	ZB5	ZB6	ZB7	ZB8
$T_{\text{amb}} (^{\circ}\text{C})$	17,18	18,13	20,77	21,71	21,90	24,04	26,73	25,32
$V_{\text{armaz}} (\text{m}^3)$	0,269	0,267	0,260	0,258	0,257	0,250	0,238	0,245

Arredondando os valores de V_{armaz} para o volume de reservatório térmico comercial mais comumente utilizado, adotou-se para todas as zonas bioclimáticas:

$$V_{\text{armaz}} = 0,3 \text{ m}^3 = 300\text{L}$$

Comprovando que o volume adotado se encontra em concordância com a sugestão da norma, tem-se:

$$V_{\text{armaz}} \geq 0,75 \cdot V_{\text{cons}} \rightarrow 0,3 \text{ m}^3 \geq 0,75 \cdot 0,328 \text{ m}^3 \rightarrow 0,3 \text{ m}^3 \geq 0,246 \text{ m}^3$$

- Demanda de energia útil

$$E_{\text{útil}} = \frac{V_{\text{armaz}} \cdot \rho \cdot Cp \cdot (T_{\text{armaz}} - T_{\text{amb}})}{3600} \quad (38)$$

Onde,

$E_{\text{útil}}$ = Energia útil (kWh/dia);

ρ = massa específica da água igual a 1.000 kg/m³;

Cp = calor específico da água igual a 4,18 kJ/kg.

- Perdas térmicas

$$E_{\text{perdas}} = 0,15 \cdot E_{\text{útil}} \quad (39)$$

Onde,

E_{perdas} = somatório das perdas térmicas dos circuitos primário e secundário (kWh/dia).

Para $T_{\text{armaz}} = 45^{\circ}\text{C}$, as T_{amb} da Tabela 41 e a partir das equações (38) e (39), chegou-se aos resultados de demanda de energia útil e perdas térmicas da Tabela 42.

Tabela 42: Energia útil e perdas térmicas

	ZB1	ZB2	ZB3	ZB4	ZB5	ZB6	ZB7	ZB8
E_{útil} (kWh/dia)	9,69	9,36	8,44	8,11	8,05	7,30	6,37	6,86
E_{perdas} (kWh/dia)	1,45	1,40	1,27	1,22	1,21	1,10	0,95	1,03

- Fator de correção para inclinação e orientação do coletor solar (FC_{instal})

$$FC_{instal} = \frac{1}{1 - [1,2 \times 10^{-4} \cdot (\beta - \beta_{ótimo})^2 + 3,5 \times 10^{-5} \cdot \gamma^2]} \quad (40)$$

Onde,

β = inclinação do coletor em relação ao plano horizontal (°);

$\beta_{ótimo}$ = inclinação ótima do coletor para o local de instalação (°). Sugere-se que seja adotado o valor da latitude local +10°;

γ = ângulo de orientação dos coletores em relação ao norte geográfico (°).

Adotou-se como inclinação do coletor o ângulo igual à latitude e a assunção de que os mesmos são instalados em direção ao norte geográfico ($\gamma = 0$), o resultado do cálculo é apresentado na Tabela 43.

Tabela 43: Fator de correção para a inclinação do coletor solar

	ZB1	ZB2	ZB3	ZB4	ZB5	ZB6	ZB7	ZB8
β	26	32	28	22	24	20	16	13
$\beta_{ótimo}$	36	42	38	32	34	30	26	23
FC_{instal}	1,012	1,012	1,012	1,012	1,012	1,012	1,012	1,012

- Produção média diária de energia específica do coletor solar (PMDEE)

$$PMDEE = 4,901 \cdot (Fr\tau\alpha - 0,0249 \cdot Fr_{UL}) \quad (41)$$

Onde,

$Fr\tau\alpha$, coeficiente de ganho do coletor solar (adimensional);

Fr_{UL} , coeficiente de perdas do coletor solar (adimensional).

Foi feita uma pesquisa de mercado considerando os modelos de coletor com registro no INMETRO. A partir de uma avaliação comparativa entre produção média de energia mensal, eficiência e preço, decidiu-se trabalhar com a marca Rinnai. A

continuação, na Tabela 44, encontram-se as características dos modelos de coletor selecionados junto ao resultado do cálculo da PMDEE.

Tabela 44: Especificações dos modelos de coletor solar selecionados
Fonte: INMETRO (2019b)

	Modelo	RSC-1000T	RSC-1400T	RSC-2000T
Pressão de funcionamento	(kPa)	392,00	392,00	392,00
	(mca)	40,00	40,00	40,00
Área externa do coletor	(m²)	1,01	1,41	2,01
Área de coleção ($A_{\text{coleção}}$)	(m²)	0,99	1,39	1,99
Produção média mensal	Por coletor (kWh/mês)	82,4	115,1	164,0
	Específica (kWh/mês.m²)	81,6	81,6	81,6
Eficiência energética média	(%)	60,29	60,29	60,29
Classificação		A	A	A
$F_{rr\alpha}$	(adm.)	0,719	0,719	0,719
F_{rUL}	(adm.)	4,83	4,83	4,83
α	(adm.)	0,018	0,018	0,018
PMDEE	(adm.)	2,93	2,93	2,93

- Área coletora e número de coletores

$$A_{\text{coletora}} = \frac{(E_{\text{útil}} + E_{\text{perdas}}) \cdot FC_{\text{instal}} \cdot 4,901}{PMDEE \cdot I_G} \quad (42)$$

Onde,

I_G = valor da irradiação global média anual para o local da instalação (kWh/m².dia).

$$N_{\text{coletora}} = \frac{A_{\text{coletora}}}{A_{\text{coleção}}} \quad (43)$$

A partir das equações (42) e (43), chegou-se nos resultados finais de área coletora e número de coletores por modelo, mostrados na Tabela 45.

Tabela 45: Área coletora e número de coletores
Fonte dos dados de irradiação solar: (CRESESB, 2019)

	ZB1	ZB2	ZB3	ZB4	ZB5	ZB6	ZB7	ZB8
I_G	4,39	4,57	4,45	5,22	4,08	5,23	5,25	5,28
Acoletora	4,29	3,99	3,69	3,03	3,84	2,72	2,36	2,53
Nº Coletores RSC-1000T	4,34	4,03	3,73	3,06	3,88	2,75	2,38	2,56
Nº Coletores RSC-1400T	3,12	2,90	2,69	2,20	2,80	1,98	1,72	1,84
Nº Coletores RSC-2000T	1,57	1,46	1,35	1,11	1,41	1,00	0,87	0,93

3.10.2. Metodologia computacional

A configuração de SAS modelada pelo programa SAM é a da Figura 30, composta por um coletor de placa plana de circuito fechado que transfere energia solar do fluido de trabalho para a água em um trocador de calor externo. No modelo, o tanque solar é enchido com água da rede elétrica, bombeado pelo trocador de calor e retornado ao topo do tanque (NREL, 2018).

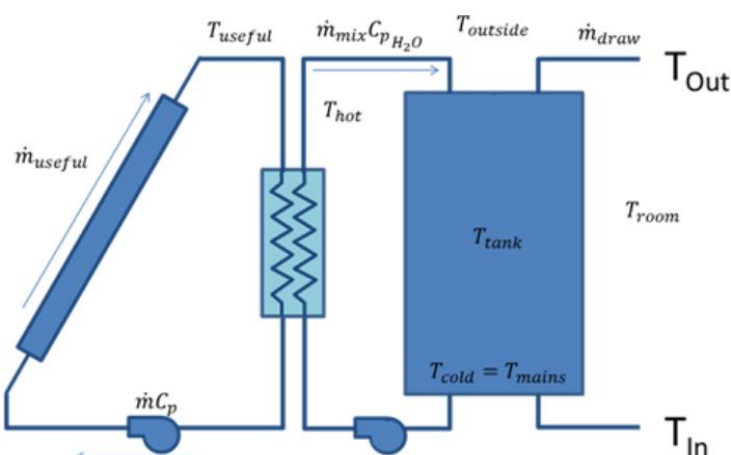


Figura 30: Configuração de SAS modelado pelo SAM.
Fonte: NREL (2018).

Para a modelagem foi necessário fornecer ao programa as seguintes informações:

- Arquivo climático: Foram empregados os mesmos arquivos climáticos do EnergyPlus, provenientes da base SWERA (DOE; BTO; NREL, 2019);
- Demanda de AQS: 328L/dia (Tabela 40);
- Inclinação do coletor: igual à latitude;
- Características do coletor solar: ingressadas manualmente a partir dos dados da Tabela 44;
- Volume do reservatório: 300L;
- $T_{cons} = 40^{\circ}\text{C}$ e $T_{armaz} = 45^{\circ}\text{C}$;
- Eficiência do trocador de calor: O sistema simulado não utiliza trocador, portanto, foi assumida eficiência igual a 100%;
- Tubulações: foram assumidos os valores *default* do programa. Comprimento = 10m, diâmetro = 0,019m, espessura do isolamento = 0,006m e condutividade igual a 0,03 W/m.°C.

Para cada ZB, foi simulada a produção de AQS utilizando os três modelos de coletor selecionados, e para três quantidades diferentes 1, 2 e 3. No total, foram rodadas 72 simulações = 8 zonas bioclimáticas x 3 modelos de coletor x 3 quantidades diferentes. A modo de exemplo, a Tabela 46 mostra os resultados da simulação das 9 configurações de coletores para a cidade de Curitiba. As variáveis da tabela correspondem a:

- Q_{auxiliar} : energia auxiliar necessária para levar a água à temperatura definida após a coleta solar;
- Q_{total} : quantidade de energia auxiliar que seria necessária se o aquecimento solar de água não fosse usado;
- fração solar - f : proporção entre a energia economizada pelo aquecimento solar e a energia total necessária, definida como,

$$f = \frac{Q_{\text{salva}}}{Q_{\text{total}}} \quad (44)$$

$$Q_{\text{salva}} = Q_{\text{total}} - Q_{\text{auxiliar}} \quad (45)$$

Para definir qual configuração final adotar, foi calculado o VPL de cada uma das alternativas. Para o cálculo do VPL foram utilizados os parâmetros econômicos previamente definidos na seção 3.7.1, Tabela 31: tarifa elétrica residencial (T_{rs}), taxa de aumento da tarifa (E_{rs}) e taxa de desconto nominal (D). Os valores correspondentes ao investimento foram calculados a partir dos custos unitários da Tabela 47, e são apresentados na Tabela 48.

A modo de exemplo, a Tabela 49 mostra o fluxo de caixa para a configuração utilizando 1 coletor do tipo RSC-1000, para a cidade de Curitiba, considerando $Q_{\text{salva}} = 1.324$ kWh/ano, $T_{\text{rs}} = 0,79878$ R\$/kWh e $E_{\text{rs}} = 6,037$ % a.a. Utilizando a taxa de desconto $D = 9,356$ %a.a. para trazer o fluxo de caixa da Tabela 49 ao presente, obteve-se um VPL igual a R\$13.245, como indica o primer quadrante da Tabela 46.

Finalmente, a configuração escolhida foi aquela que apresentou maior VPL e menor investimento, simultaneamente. No caso de Curitiba, essa configuração foi a de dois coletores modelo RSC2000T, marcada em negrito. Os resultados para todas as zonas bioclimáticas encontram-se resumidos na seção de resultados, item 4.4.

Tabela 46: Simulação da produção do SAS para Curitiba

Área coletora NBR 15569	4,29 m ²		
	RSC1000T x 1	RSC1400T x 1	RSC2000T x1
Área coletora (m ²)	0,99	1,39	1,99
Q_auxiliar (kWh)	1.387	945	534
Q_total (kWh)	2.711	2.711	2.711
Fração solar - f (%)	0,49	0,65	0,80
Investimento (R\$)	2.302	2.417	2.571
VPL (R\$)	13.245	18.324	22.994
	RSC1000T x 2	RSC1400T x 2	RSC2000T x2
Área coletora (m ²)	1,98	2,78	3,97
Q_auxiliar (kWh)	549	312	192
Q_total (kWh)	2.711	2.711	2.711
Fração solar - f (%)	0,80	0,88	0,93
Investimento (R\$)	2.821	3.052	3.361
VPL (R\$)	22.565	25.120	26.221
	RSC1000T x 3	RSC1400T x 3	RSC2000T x3
Área coletora (m ²)	2,97	4,16	5,96
Q_auxiliar (kWh)	285	183	116
Q_total (kWh)	2.711	2.711	2.711
Fração solar - f (%)	0,89	0,93	0,96
Investimento (R\$)	3.341	3.687	4.150
VPL (R\$)	25.146	26.007	26.330

Tabela 47: Custos dos insumos do SAS

Insumo	Custo (R\$)	Fonte
RSC1000T	509,56	(COOPERSOL, 2020a)
RSC1400T	622,65	(COOPERSOL, 2020a)
RSC2000T	773,89	(COOPERSOL, 2020a)
Reservatório 300L	1580,48	(COOPERSOL, 2020b)
Custos de mão de obra para instalação	166,42	(CYPE, 2019)
Custos diretos complementares	2% sobre o total	(CYPE, 2019)

Tabela 48: Investimento nas diferentes configurações do SAS

Modelo de coletor	RSC1000T	RSC1400T	RSC2000T
Investimento (R\$) – 1 coletor	2.302	2.417	2.571
Investimento (R\$) – 2 coletores	2.821	3.052	3.361
Investimento (R\$) – 3 coletores	3.341	3.687	4.150

Tabela 49: Exemplo de fluxo de caixa para a configuração com 1 coletor RSC1000T

Ano	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	(...)
FC _t	-2.302	1.121	1.189	1.261	1.337	1.418	1.503	1.594	1.690	1.792	(...)
(...)	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
(...)	1.901	2.015	2.137	2.266	2.403	2.548	2.702	2.865	3.038	3.221	3.416

3.11. CÁLCULO DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS (SF)

A construção a partir de CMs é ideal para uso em regiões rurais afastadas, serviços sazonais e aplicações pós-catástrofes. Mas também, é uma tendência da arquitetura urbana aplicada aos setores residencial, comercial e público. Dada essa versatilidade de aplicações, somada à característica de transportabilidade, decidiu-se dimensionar o SF para o caso *off-grid* e *on-grid*. Desta forma, é possível comparar a diferença, de um ponto de vista econômico, entre edificações com possibilidade de conectar-se à rede elétrica e aquelas afastadas.

3.11.1. Sistemas fotovoltaicos isolados (SFIs)

Para o dimensionamento do SFI foi utilizado o método do mês crítico, o qual supõe que se o SF funciona adequadamente no mês mais desfavorável na relação carga/irradiação, isso ocorrerá também nos demais meses do ano. O dimensionamento pelo método do mês crítico inclui as seguintes etapas de cálculo (CEPEL; CRESESB, 2014):

1. Dimensionamento do painel fotovoltaico (PF)

- Energia ativa necessária diariamente (L)

Considerou-se que todas as cargas do sistema são em corrente alternada e, portanto,

$$L = \frac{L_{ca}}{d \cdot \eta_{bat} \cdot \eta_{inv}} \quad (46)$$

Onde,

L_{ca} = energia consumida mensalmente em corrente alternada (kWh/mês);

d = quantidade de dias do mês;

η_{bat} = eficiência global da bateria (%). Valor sugerido = 86%;

η_{inv} = eficiência do inversor (%). Valor sugerido = 90%.

- Potência do PF (P_m)

$$P_m = \max_{i=1}^{12} \frac{L_i}{HSP_i \cdot Red_1 \cdot Red_2} \quad (47)$$

Onde,

L_i = energia consumida diariamente no mês i (obtida pela equação (46)) (kWh/dia);

HSP_i (47) = horas de sol pleno no plano do PF no mês i (h/dia);

Red_1 = fator de redução da potência dos módulos, englobando: efeito da sujeira, degradação, tolerância de fabricação e perdas devido à temperatura. Valor *default* = 0,75;

Red_2 = fator de redução da potência devido a perdas no sistema, incluindo fiação, controlador, diodos, etc. Valor *default* = 0,9.

Os valores de energia consumida mensal utilizados no dimensionamento são os correspondentes ao MOC, considerando a energia elétrica auxiliar simulada para o SAS. Esses valores encontram-se disponíveis na seção resultados, Tabela 81 ($Constot_{MOC,SAS}$). A partir das equações (46) e (47), utilizando os valores sugeridos/default para cada termo, chegou-se nos resultados da Tabela 50, onde P_m corresponde aos campos assinalas em negrito.

Tabela 50: Cálculo da potência do PF
Fonte dos dados de HSPs: (CRESESB, 2019)

		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
	d	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	Constot MOC,SAS
ZB1	Lca (kWh/mês)	149,3	140,3	132,9	141,2	194,6	226,5	281,6	245,1	231,4	190,8	143,2	132,8	2209,7
	Li (kWh/dia)	6,2	6,5	5,5	6,1	8,1	9,8	11,7	10,2	10,0	8,0	6,2	5,5	
	HSPi (h/dia)	4,8	4,9	4,7	4,4	3,9	3,6	3,8	4,7	4,1	4,3	4,8	4,9	
	Pm (kWp)	1,9	2,0	1,8	2,1	3,1	4,0	4,6	3,3	3,6	2,7	1,9	1,7	
ZB2	Lca (kWh/mês)	212,1	191,1	171,3	136,4	165,1	243,2	257,2	280,9	204,8	169,3	137,5	137,4	2306,4
	Li (kWh/dia)	8,8	8,8	7,1	5,9	6,9	10,5	10,7	11,7	8,8	7,1	5,9	5,7	
	HSPi (h/dia)	5,6	5,4	5,1	4,5	3,7	3,3	3,4	3,8	3,9	4,8	5,6	5,7	
	Pm (kWp)	2,3	2,4	2,1	1,9	2,7	4,7	4,6	4,5	3,3	2,2	1,6	1,5	
ZB3	Lca (kWh/mês)	247,1	220,2	163,4	126,9	142,2	192,0	213,4	164,1	171,6	136,2	168,2	219,6	2164,8
	Li (kWh/dia)	10,3	10,2	6,8	5,5	5,9	8,3	8,9	6,8	7,4	5,7	7,2	9,2	
	HSPi (h/dia)	5,2	5,2	4,9	4,4	4,0	3,5	3,6	4,2	3,8	4,3	5,0	5,3	
	Pm (kWp)	2,9	2,9	2,0	1,8	2,2	3,5	3,7	2,4	2,9	2,0	2,1	2,6	
ZB4	Lca (kWh/mês)	212,6	159,0	210,0	173,7	140,5	163,1	153,9	154,3	141,2	194,4	158,9	186,9	2048,6
	Li (kWh/dia)	8,9	7,3	8,8	7,5	5,9	7,0	6,4	6,4	6,1	8,1	6,8	7,8	
	HSPi (h/dia)	5,0	5,5	5,2	5,3	4,9	4,8	5,0	5,7	5,3	5,4	5,2	5,4	
	Pm (kWp)	2,6	2,0	2,5	2,1	1,8	2,2	1,9	1,7	1,7	2,2	1,9	2,2	
ZB5	Lca (kWh/mês)	291,3	242,5	210,2	172,4	134,6	172,1	190,6	172,0	133,8	154,7	181,3	244,8	2300,3
	Li (kWh/dia)	12,1	11,2	8,8	7,4	5,6	7,4	7,9	7,2	5,8	6,4	7,8	10,2	
	HSPi (h/dia)	4,5	4,9	4,4	4,3	3,9	3,6	3,6	4,1	3,6	3,7	4,0	4,5	
	Pm (kWp)	4,0	3,4	3,0	2,6	2,1	3,0	3,3	2,6	2,4	2,6	2,9	3,4	
ZB6	Lca (kWh/mês)	280,8	202,8	219,9	205,3	165,4	157,6	167,7	202,2	208,3	232,1	252,3	266,0	2560,3
	Li (kWh/dia)	11,7	9,4	9,2	8,8	6,9	6,8	7,0	8,4	9,0	9,7	10,9	11,1	
	HSPi (h/dia)	5,2	5,4	5,5	5,4	4,8	4,7	4,8	5,6	5,2	5,3	5,5	5,5	
	Pm (kWp)	3,4	2,6	2,5	2,4	2,1	2,1	2,1	2,2	2,6	2,7	2,9	3,0	
ZB7	Lca (kWh/mês)	382,0	317,5	350,5	303,7	288,6	222,9	252,7	274,5	256,7	335,0	302,7	352,1	3638,9
	Li (kWh/dia)	15,9	14,6	14,6	13,1	12,0	9,6	10,5	11,4	11,1	14,0	13,0	14,7	
	HSPi (h/dia)	5,0	5,1	5,2	5,3	5,0	5,2	5,3	6,0	5,3	5,2	5,2	5,2	
	Pm (kWp)	4,7	4,2	4,2	3,7	3,5	2,8	3,0	2,8	3,1	4,0	3,7	4,2	
ZB8	Lca (kWh/mês)	320,8	270,8	304,6	274,4	235,2	210,8	180,4	174,4	189,7	221,5	237,1	266,3	2886,1
	Li (kWh/dia)	13,4	12,5	12,7	11,8	9,8	9,1	7,5	7,3	8,2	9,2	10,2	11,1	
	HSPi (h/dia)	5,8	5,9	5,9	4,9	4,5	4,2	4,5	4,9	5,6	5,7	5,7	5,9	
	Pm (kWp)	3,4	3,1	3,2	3,6	3,3	3,2	2,5	2,2	2,2	2,4	2,7	2,8	

- Escolha do módulo fotovoltaico (MF)

Foram comparados diversos modelos e marcas de MF, considerando o indicador custo sobre produção média de energia mensal (R\$/kWh/mês). Além disso, procurou-se que os modelos comparados fossem certificados pelo INMETRO e com

potências a partir de 270Wp. A Tabela 51 contém as especificações do MF selecionado nas condições padrão de teste (*Standard Test Conditions* – STC).

Tabela 51: Especificações do módulo fotovoltaico nas condições padrão

Marca / modelo	CANADIAN SOLAR / CS6U-325P
Área (m²)	1,94
Potência na condição padrão - P_{NMF} (kW)	0,325
Produção anual média de energia (kWh/mês)	40,63
Eficiência energética (%)	16,72
Peso (kg)	22,4
Tensão de máxima potência – V_{mp} (V)	37,00
Corrente no ponto de máxima potência – I_{mp} (A)	8,78
Voltagem de circuito aberto – V_{oc} (V)	45,50
Corrente de curto circuito – I_{sc} (A)	9,34
Coeficiente de temperatura – β (%/°C)	-0,31

- Quantidade de módulos fotovoltaicos (NM)

$$NM = \frac{P_m}{P_{NMF}} \quad (48)$$

A partir dos resultados da Tabela 50 e aplicando (49) chegou-se na quantidade de MF da Tabela 52.

Tabela 52: Número de módulos fotovoltaicos

	ZB1	ZB2	ZB3	ZB4	ZB5	ZB6	ZB7	ZB8
P_m	4,6	4,7	3,7	2,6	4,0	3,4	4,7	3,6
NM	14,3	14,6	11,3	8,0	12,3	10,3	14,4	11,0

2. Dimensionamento do banco de baterias

- Capacidade do sistema de acumulação

Para o cálculo da capacidade do sistema de acumulação, da energia solicitada pelas cargas cada mês (L_i), escolhe-se o valor máximo (L_m) e aplicam-se as seguintes equações,

$$L_m = \max_{i=1}^{12} (L_i) \quad (49)$$

$$CB_{c20}(Wh) = \frac{L_m \cdot 1000 \cdot N}{P_d} \quad (50)$$

$$CBI_{C20}(Ah) = \frac{CB_{C20}}{V_{sist}} \quad (51)$$

Onde,

CB_{C20} = capacidade do banco de baterias em Wh para o regime de descarga em 20 horas (C20);

CBI_{C20} = capacidade do banco em Ah;

P_d = máxima profundidade de descarga da bateria considerando o período de autonomia. Valores típicos entre 20 e 40%. Adotou-se 25%;

V_{sist} = tensão nominal do sistema, normalmente 12V, 24V ou 48V;

N = número de dias de autonomia, calculado como,

$$N = -0,48 \cdot HSP_{min} + 4,58 \quad (52)$$

- Escolha da bateria

Das baterias utilizadas em SFs, foram selecionadas aquelas de maior capacidade e escolhido o modelo mais econômico. Na Tabela 53 encontram-se as especificações do modelo escolhido.

Tabela 53: Especificações da bateria selecionada
Fonte: (MOURA, 2019)

Marca	Modelo	Tensão nominal (V)	Capacidade a 25°C (Ah)		
			5h 1,75Vpe	10h 1,75Vpe	20h 1,75Vpe
Moura	12MF220	12	179,4	200	220

- Baterias em paralelo

$$N^{\circ} \text{ baterias paralelo} = \frac{CBI}{CBI_{bat}} \quad (53)$$

Onde CBI_{bat} representa a capacidade da bateria selecionada, em Ah, no mesmo regime de descarga do valor calculado para CBI. Deve ser utilizado o menor número possível de baterias em paralelo, os fabricantes recomendam um máximo entre 4 e 6.

- Baterias em série

$$N^{\circ} \text{ baterias série} = \frac{V_{sist}}{V_{bat}} \quad (54)$$

Onde V_{bat} é a tensão nominal da bateria selecionada.

Na Tabela 54 se encontra o resumo do dimensionamento do banco de baterias, aplicando as equações (49) a (54), para dois valores diferentes de tensão nominal do sistema: 24 e 48V.

Tabela 54: Dimensionamento do banco de baterias
Fonte dos dados de HSPs: (CRESESB, 2019)

	ZB1	ZB2	ZB3	ZB4	ZB5	ZB6	ZB7	ZB8
Lm	11,74	11,7	10,3	8,9	12,1	11,7	15,9	13,4
HSPmin	3,64	3,3	3,5	4,8	3,6	4,7	5,0	4,2
N	2,83	3,0	2,9	2,3	2,9	2,3	2,2	2,6
CBC20 (Wh)	132.977	140.762	119.062	80.670	138.955	108.561	137.588	136.882
Tensão nominal do sistema = 24V								
CBIC20 (Ah) - 24 V	5.541	5.865	4.961	3.361	5.790	4.523	5.733	5.703
Nº bat paralelo_24 V	25,2	26,7	22,5	15,3	26,3	20,6	26,1	25,9
Nº bat série_24 V	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Nº bat tot 24 V	50	53	45	31	53	41	52	52
Tensão nominal do sistema = 48V								
CBIC20 (Ah) - 48 V	2.770	2.933	2.480	1.681	2.895	2.262	2.866	2.852
Nº bat paralelo_48 V	12,6	13,3	11,3	7,6	13,2	10,3	13,0	13,0
Nº bat série_48 V	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Nº bat tot 48 V	50	53	45	31	53	41	52	52

- Arranjo do sistema

Visto que o número de baterias calculado é grande e que não é possível conectar mais do que 6 em paralelo, foi necessário fazer arranjos em blocos. A partir dos critérios: (i) máximo de 4 a 6 baterias em paralelo, (ii) voltagem do sistema 24V, correspondente a 2 baterias em série, ou voltagem do sistema 48V, correspondente a 4 baterias em série, é possível formar as combinações da Tabela 55.

Tabela 55: Possíveis configurações de blocos de baterias

	Tensão nominal do sistema = 24V		
Baterias em série	2		
Baterias em paralelo	4	5	6
Combinações possíveis	2x4 = 8 bat	2x5 = 10 bat	2x6 = 12bat
	Tensão nominal do sistema = 48V		
Baterias em série	4		
Baterias em paralelo	4	5	6
Combinações possíveis	4x4 = 16bat	4x5 = 20bat	4x6 = 24bat

Para determinar o melhor arranjo de blocos de baterias e MF por bloco, foi necessário formular todas as possíveis configurações, para cada ZB. Para tal, foi montada uma planilha equivalente à da Tabela 56, para cada uma das zonas bioclimáticas. Na planilha encontram-se às 6 configurações de blocos possíveis e 3 números diferentes de MF. Para chegar na melhor configuração, escolheu-se a que deu por resultado valores inteiros, e por sua vez, a que melhor se aproxima dos resultados dos cálculos de N° de baterias (Tabela 54) e NM (Tabela 52).

Tabela 56: Determinação do arranjo de blocos de baterias e módulos/bloco para Curitiba

N° de baterias total	50	NM	14			
Configuração	2x4	2x5	2x6	4x4	4x5	4x6
N° de blocos de baterias	$50/(2 \times 4)=6$	$50/(2 \times 5)=5$	$50/(2 \times 6)=4$	$50/(4 \times 4)=3$	$50/(4 \times 5)=3$	$50/(4 \times 6)=2$
N° de baterias total'	$2 \times 4 \times 6=48$	$2 \times 5 \times 5=50$	$2 \times 6 \times 4=48$	$4 \times 4 \times 3=48$	$4 \times 5 \times 3=60$	$4 \times 6 \times 2=48$
	Considerando NM=14					
Número de MF por bloco	$14/6=2,3$	$14/5=2,8$	$14/4=3,5$	$14/3=4,7$	$14/3=4,7$	$14/2=7,0$
	Considerando NM=15					
Número de MF por bloco	$15/6=2,5$	$15/5=3,0$	$15/4=3,8$	$15/3=5,0$	$15/3=5,0$	$15/2=7,5$
	Considerando NM=16					
Número de MF por bloco	$16/6=2,7$	$16/5=3,2$	$16/4=4,0$	$16/3=5,3$	$16/3=5,3$	$16/2=8,0$

Repetindo o procedimento para cada ZB, chegou-se nos arranjos da Tabela 57.

Tabela 57: Arranjo de blocos de baterias e MF/bloco final

	ZB1	ZB2	ZB3	ZB4	ZB5	ZB6	ZB7	ZB8
	Resultado dos cálculos							
NM	14	15	11	8	12	10	14	11
Nº de baterias total	50	53	45	31	53	41	52	52
	Melhor arranjo							
Configuração	4x6	4x5	4x6	2x5	4x5	4x5	4x5	4x5
Nº de blocos de baterias	2	3	2	3	3	2	3	3
Nº de baterias total'	48	60	48	30	60	40	60	60
Número de MF por bloco	7 ou 8	5 ou 6	6	3	4	5 ou 6	5 ou 6	4

3. Dimensionamento do controlador de carga SPPM

- Escolha do controlador

Foram selecionados os quatro modelos de controlador de carga com SPPM (seguimento do ponto de máxima potência) da Tabela 58.

Tabela 58: Especificações dos controladores de carga selecionados
Fonte: (NEOSOLAR, 2020a)

Nº de controlador	1	2	3	4
Modelo	Epever Triron 4210N	Epever Tracer 4215BN	Epever Tracer 54150AN	Epever Tracer 6415AN
Corrente máxima do controlador - I_c (A)	43,33	43,33	52,08	62,5
Mínima tensão de operação do SPPM - $V_{SPPMmin}$ (V)	26	26	50	0
Máxima tensão de operação do SPPM - $V_{SPPMmax}$ (V)	72	108	108	108
Máxima tensão de operação do controlador - $V_{c, max}$	100	150	150	150
Voltagem nominal do sistema	12 e 24	12 e 24	12/24/36/48	12/24/36/48

- Número de MF em série

O número de MF em série deve ser tal que a tensão de saída do PF esteja dentro da faixa ótima de operação do controlador,

$$\frac{V_{SPPMmin}}{V_{mpTmax}} < N^{\circ} \text{ módulos série} < \frac{V_{SPPMmax}}{V_{mpTmin}} \quad (55)$$

Onde,

$V_{SPPMmax}$ e $V_{SPPMmin}$ = máxima e mínima tensão de operação do SPPM, respectivamente;

V_{mpTmax} e V_{mpTmin} = tensões de máxima potência do MF nas suas máximas e mínima temperaturas de operação, respectivamente.

O cálculo do V_{mp} em determinada temperatura é feito por meio da equação:

$$V_{mp}(T) = V_{mp,STC} [1 + \beta(T_{mod} - 25)] \quad (56)$$

Onde,

β = coeficiente de variação da tensão de circuito aberto com a temperatura;

T_{mod} = temperatura do MF, calculada,

$$T_{mod} = T_{amb} + K_t \cdot G \quad (57)$$

Onde,

K_t = coeficiente térmico para o MF ($^{\circ}\text{C}/\text{W}\cdot\text{m}^2$). Valor sugerido 0,03;

G = irradiância incidente sobre o MF (W/m^2).

A partir das equações (56) e (57), considerando as especificações dos MFs (Tabela 51), $G = 1.200 \text{ W}/\text{m}^2$ para o cálculo de T_{mod} na temperatura máxima absoluta e $G = 10 \text{ W}/\text{m}^2$ na temperatura mínima absoluta, chegou-se aos resultados da Tabela 59.

Tabela 59: Tensões de máxima potência nas temperaturas extremas
Fonte das temperaturas extremas: (INMET, 2020)

	ZB1	ZB2	ZB3	ZB4	ZB5	ZB6	ZB7	ZB8
Temperatura máxima absoluta - Tmax ($^{\circ}\text{C}$)	34,9	39,8	40	37,9	42	42	42,5	35,6
Temperatura mínima absoluta - Tmin ($^{\circ}\text{C}$)	-3,5	-3	2,6	-1	3,5	-5	8,2	17,5
Tmod,max ($^{\circ}\text{C}$)	72,4	77,3	77,5	75,4	79,5	79,5	80	73,1
Tmod,min ($^{\circ}\text{C}$)	-3,2	-2,7	2,9	-0,7	3,8	-4,7	8,5	17,8
Vmp(Tmax) ($^{\circ}\text{C}$)	31,6	31,0	31,0	31,2	30,7	30,7	30,7	31,5
Vmp(Tmin) ($^{\circ}\text{C}$)	40,2	40,2	39,5	39,9	39,4	40,4	38,9	37,8

A partir da equação (55) e os resultados da Tabela 59, chegou-se na Tabela 60, a qual mostra a quantidade de MFs que podem ser conectados em série para cada modelo de controlador de carga.

Tabela 60: Cálculo do N° de módulos em série

	Epever Triron 4210N VSPPM,min = 26V / VSPPM,max = 76V			Epever Tracer 4215BN VSPPM,min = 26V / VSPPM,max = 108V			Tracer 6415AN e Tracer 54150AN VSPPM,min = 50V / VSPPM,max = 108V		
	$V_{SPPMmin}/V_{mpTmax}$	< N° mód. Série<	$V_{SPPMmax}/V_{mpTmin}$	$V_{SPPMmin}/V_{mpTmax}$	< N° mód. Série<	$V_{SPPMmax}/V_{mpTmin}$	$V_{SPPMmin}/V_{mpTmax}$	< N° mód. Série<	$V_{SPPMmax}/V_{mpTmin}$
ZB1	0,82	1	1,79	0,82	1 ou 2	2,68	1,58	2	2,68
ZB2	0,84	1	1,79	0,84	1 ou 2	2,69	1,61	2	2,69
ZB3	0,84	1	1,82	0,84	1 ou 2	2,73	1,61	2	2,73
ZB4	0,83	1	1,80	0,83	1 ou 2	2,70	1,60	2	2,70
ZB5	0,85	1	1,83	0,85	1 ou 2	2,74	1,63	2	2,74
ZB6	0,85	1	1,78	0,85	1 ou 2	2,67	1,63	2	2,67
ZB7	0,85	1	1,85	0,85	1 ou 2	2,78	1,63	2	2,78
ZB8	0,83	1	1,90	0,83	1 ou 2	2,86	1,59	2	2,86

- Número de MFs em paralelo

Para o cálculo do número de fileiras em paralelo, deve-se considerar a potência do gerador (P_m) e a potência de cada fileira,

$$N^{\circ} \text{ módulos paralelo} = \frac{P_m}{N^{\circ} \text{ módulos série} \cdot P_{mod}} \quad (58)$$

Onde,

P_{mod} = potência nominal do MF adotado (kWp).

Recomenda-se verificar se a corrente do painel (I_m), está de acordo com as especificações do controlador para operação do SPPM, mediante a equação,

$$I_m = N^{\circ} \text{ módulos paralelo} \cdot I_{mp} \quad (59)$$

Onde,

I_{mp} = corrente do MF no ponto de máxima potência, nas condições padrão de ensaio.

- Limites máximos do controlador

Para definir a corrente máxima do controlador (I_c), aplica-se,

$$I_c = 1,25 \cdot N^{\circ} \text{ módulos paralelo} \cdot I_{sc} \quad (60)$$

Onde,

I_{sc} = corrente do curto circuito do MF (A).

Pra definir a máxima tensão de operação do controlador de carga ($V_{c,max}$), aplica-se,

$$N^{\circ} \text{ módulos série} \cdot V_{ocTmin} < V_{cmax} \quad (61)$$

Onde,

V_{ocTmin} = tensão de circuito aberto do MF, na menor temperatura de operação prevista.

Cada bloco de baterias é conectado a um controlador de carga. Para determinar qual modelo de controlador aplicar por sistema, foi considerada a voltagem nominal do sistema e testado o modelo de menor Ic. A partir dos arranjos de baterias e MF/bloco (Tabela 57), das especificações do MF (Tabela 51) e dos controladores (Tabela 58), do número de MF em série que podem ser conectados por controlador (Tabela 60) e das equações (58) a (61), montou-se a Tabela 61 na qual resume-se o dimensionamento do controlador de carga e os arranjos finais por ZB.

Tabela 61: Dimensionamento do controlador de carga

	ZB1	ZB2	ZB3	ZB4	ZB5	ZB6	ZB7	ZB8
Vsist	48V	48V	48V	24V	48V	48V	48V	48V
Nºcontroladores	2	3	2	3	3	2	3	3
Controlador Nº	3	3	3	1	3	3	3	3
MF/controlador	8	6	6	3	4	6	6	4
Pm	2.600	1.950	1.950	975	1.300	1.950	1950	1300
Nº mód série	2	2	2	1	2	2	2	2
Nº mód paralelo	4	3	3	3	2	3	3	2
Im	35,12	26,34	26,34	26,34	17,56	26,34	26,34	17,56
	<50	<50	<50	<40	<50	<50	<50	<50
Ic	46,7	35,025	35,025	35,025	23,35	35,025	35,025	23,35
	<52.08	<52.08	<52.08	<43,33	<52.08	<52.08	<52.08	<52.08
Voc,Tmin*	49,48	49,41	48,62	49,12	48,49	49,69	47,83	46,52
Nº mód série x Voc,Tmin	98,96	98,81	97,23	49,12	96,98	99,38	95,65	93,03
Vc,max	<150	<150	<150	<100	<150	<150	<150	<150

*O cálculo de $V_{oc,Tmin}$ seguiu o mesmo procedimento do ponto 3.

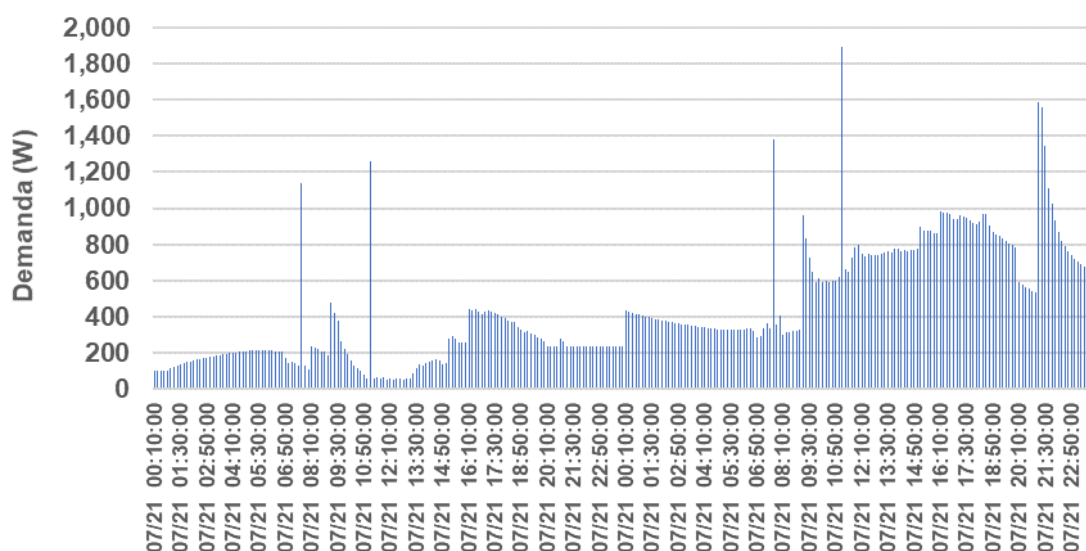
4. Dimensionamento do inversor

A potência do inversor deve ser igual ou superior à potência máxima da curva de carga. De forma mais conservadora, a potência do inversor pode ser especificada igual ou superior à potência instalada, que é o somatório da potência de todas as cargas do usuário. Além disso, a tensão de entrada deve ser igual à tensão c.c. do banco de baterias e tensão c.a. conforme necessidade, normalmente 127 ou 220V. Também, é recomendável a utilização de inversores de forma de onda senoidal. A partir dessas indicações, foram selecionados os quatro modelos de inversor da Tabela 62.

Tabela 62: Especificações dos inversores selecionados

Modelo	SHI2000-22	SHI2000-42	SHI3000-22	SHI3000-42
Voltagem nominal baterias (V)	24	48	24	48
Voltagem de saída (V)	220 Vac $\pm$ 3	220 Vac $\pm$ 3	220 Vac $\pm$ 3	220 Vac $\pm$ 3
Potência contínua (W)	2.000	2.000	3.000	3.000
Potência 10s (W)	3.000	3.000	4.500	4.500
Potência 1.5s (W)	4.000	4.000	6.000	6.000
Potência de surto (W)	4.600	4.600	6.900	6.900
Eficiência na potência nominal (%)	≥ 93	≥ 94	≥ 93	≥ 94
Eficiência máxima (%)	≥ 95	≥ 95	≥ 95	≥ 95

Visto que Cuiabá é a cidade de maior consumo energético, sua demanda de potência também será a maior. Dessa forma, a potência máxima da curva de carga de Cuiabá apresentada na Figura 31, foi considerada também, como a potência máxima para todas as zonas bioclimáticas. Na curva, foram considerados todos os equipamentos elétricos menos o boiler do SAS, o qual possui demanda igual a 3.000W.

Figura 31: Curva de carga do dia de desenho para Cuiabá. $P_{\text{máx}} = 1.900\text{W}$.

Dado que o boiler demanda 3.000 W, mesmo sendo escassamente utilizado, em cada sistema é necessário instalar um inversor de 3.000 W. Como mostra a curva de carga, o máximo demandado em simultâneo pelo restante das cargas é 1.900W, porém, de acordo com a Tabela 63, é possível chegar na potência de 4.500W. Portanto, fazendo uma média aproximada entre a curva e a potência instalada, foi considerado que 3.000 W podem suprir todas as cargas simultâneas. Por cada bloco de baterias é necessário instalar um inversor. Sendo assim, para os casos com 3

blocos de baterias, foi considerado 1 inversor de 3.000W, para garantir a demanda do boiler, e 2 inversores de 2.000W para suprir o resto da demanda. Nos casos com 2 blocos, foi considerado 1 inversor de 3.000W, para o boiler, e um de 3.000W para atender o resto das cargas. Seguindo os critérios mencionados, o resultado do dimensionamento do inversor, encontra-se na Tabela 64.

Tabela 63: Potência instalada

Geladeira (W)	130
Liquidificador (W)	300
Micro-ondas (W)	1.200
Notebook (W)	40
TV (W)	190
Computador (W)	63
Iluminação (W)	124
Ar - 42LUQC12C5 (W)	1.161
Ar - 42LUQC07C5 (W)	633
Ar - 42LUQC07C5 (W)	633
TOTAL (W)	4.474

Tabela 64: Dimensionamento dos inversores

	Vsist	Nº controladores	Nº inversores
ZB1	48V	2	2 x SHI3000-42
ZB2	48V	3	2 x SHI2000-42 + 1 x SHI3000-42
ZB3	48V	2	2 x SHI3000-42
ZB4	24V	3	2 x SHI2000-22 + 1 x SHI3000-22
ZB5	48V	3	2 x SHI2000-42 + 1 x SHI3000-42
ZB6	48V	2	2 x SHI3000-42
ZB7	48V	3	2 x SHI2000-42 + 1 x SHI3000-42
ZB8	48V	3	2 x SHI2000-42 + 1 x SHI3000-42

3.11.2. Sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCRs)

No sistema de compensação de energia brasileiro, quando o SFV gera mais energia do que a demandada pela instalação consumidora, o excedente é entregue à rede elétrica. O contrário ocorre quando a edificação consome mais energia do que a gerada pelo SFV. No final do mês, caso o balanço energético seja positivo, a distribuidora disponibilizará um crédito energético referente ao excedente, que será compensado nas faturas subsequentes, em um prazo de até 36 meses. No caso que a energia gerada é maior que a consumida, é cobrado no mínimo o valor referente ao

custo de disponibilidade para o consumidor do grupo B (baixa tensão). Logo, para se dimensionar o gerador FV, deve-se levantar o consumo médio diário anual descontando o valor da disponibilidade mínima de energia. Para consumidor monofásico ou bifásico a 2 condutores, esse custo de disponibilidade corresponde a 30kWh. O dimensionamento do SFCR inclui as seguintes etapas de cálculo (CEPEL; CRESESB, 2014),

1. Dimensionamento do PF

A potência do microgerador que compõe um SFCR calcula-se,

$$P_{FV} (Wp) = \frac{(E/TD)}{HSP_{MA}} \quad (62)$$

Onde,

P_{FV} = potência de pico do painel FV (kWp);

E = Consumo diário médio anual da edificação ou fração deste (kWh/dia);

HSP_{MA} = Média diária anual das HSPs incidente no plano do painel FV;

TD = Taxa de desempenho (%). Valor sugerido = 80%.

O MF escolhido é o mesmo que para o SFI, cujas especificações foram apresentadas previamente na Tabela 51. O consumo médio diário anual a ser utilizado, também é o mesmo que para o SFI; correspondente ao consumo do MOC, considerando a energia elétrica auxiliar simulada para o SAS e descontando o valor da disponibilidade mínima de energia. Na Tabela 65 se encontra o cálculo da potência do microgerador; as HSPs consideram o ângulo igual à latitude, a potência do MF é igual a 325Wp (PNMF) e a taxa de desempenho foi definida como 80%.

Tabela 65: Potência e número de módulos dos SFCRs
Fonte dos dados das HSPs: (CRESESB, 2019)

	ZB1	ZB2	ZB3	ZB4	ZB5	ZB6	ZB7	ZB8
E (kWh/dia)	5,07	5,33	4,94	4,63	5,32	6,03	8,98	6,92
Latitude	26° N	32° N	28° N	22° N	24° N	20° N	16° N	13° N
HSP_{MA} (h/dia)	4,39	4,57	4,45	5,22	4,08	5,23	5,25	5,28
P_{FV} (kWp)	1,44	1,46	1,39	1,11	1,63	1,44	2,14	1,64
NM arredondado	5	5	4	4	5	5	7	5
P_{FV}' (kWp) = NM · P_{NMF}	1,625	1,625	1,3	1,3	1,625	1,625	2,275	1,625

2. Dimensionamento do inversor

- Escolha dos inversores considerando o FDI

O fator de dimensionamento do inversor (FDI) representa a relação entre a potência nominal c.a. do inversor e a potência de pico do gerador FV,

$$FDI = \frac{P_{Nca}}{P_{FV}} \rightarrow P_{Nca} = FDI \cdot P_{FV} \quad (63)$$

Onde,

P_{Nca} = potência nominal em corrente alternada do inversor (W);

P_{FV} = potência pico do PF (W).

Recomenda-se que o FDI esteja na faixa de 0,75 a 0,85, enquanto o limite superior é 1,05. Tendo em vista a faixa recomendada para o FDI, foi montada a Tabela 66, na qual foram calculadas as potências admissíveis de inversor (P_{Nca}), por sistema, de acordo com (63). A partir desse cálculo, para selecionar o inversor procurou-se que a sua potência nominal estivesse dentro dos valores obtidos para P_{Nca} . Além disso, foram considerados aqueles modelos de inversor certificados pelo INMETRO, a credibilidade da empresa e o preço.

Tabela 66: Dimensionamento do inversor, P_{Nca} admissíveis de acordo com FDI

FDI	ZB1	ZB2	ZB3	ZB4	ZB5	ZB6	ZB7	ZB8
0,75	1,22	1,22	0,98	0,98	1,22	1,22	1,71	1,22
0,8	1,30	1,30	1,04	1,04	1,30	1,30	1,82	1,30
0,85	1,38	1,38	1,11	1,11	1,38	1,38	1,93	1,38
0,9	1,46	1,46	1,17	1,17	1,46	1,46	2,05	1,46
0,95	1,54	1,54	1,24	1,24	1,54	1,54	2,16	1,54
1	1,63	1,63	1,30	1,30	1,63	1,63	2,28	1,63
1,05	1,71	1,71	1,37	1,37	1,71	1,71	2,39	1,71
Inversores selecionados								
Modelo	CSI-1.5K-TL	CSI-1.5K-TL	ecos-1000	ecos-1000	CSI-1.5K-TL	CSI-1.5K-TL	ecos-2000	CSI-1.5K-TL
Pnca	1,6	1,6	1	1	1,6	1,6	2	1,6

- Tensão de entrada

A máxima tensão de entrada nunca deve ser ultrapassada, para tanto, deve ser respeitado,

$$N^{\circ} \text{ módulos série} \cdot V_{OCTmin} < Vi_{max} \quad (64)$$

Onde,

V_{OCTmin} = tensão em circuito aberto (Voc) de um MF na menor temperatura de operação prevista (V);

Vi_{max} = máxima tensão c.c. admitida pela entrada do inversor (V).

- Faixa de tensão de operação do SPPM do inversor
Idem ao procedimento do SFI (seção 3.11.1), item 3, equações (55) a (57).
- Corrente máxima do inversor

$$N^{\circ} \text{ seriesFV em paralelo} = \frac{Ii_{max}}{I_{sc}} \quad (65)$$

Onde,

Ii_{max} = corrente máxima c.c. admitida na entrada do inversor (A);

I_{sc} = corrente de curto circuito do módulo FV nas STC (A).

As voltagens V_{OCTmin} , V_{mpTmax} e V_{mpTmin} foram calculadas anteriormente para o SFI (Tabela 59 e Tabela 61).

Na Tabela 67 encontra-se a comprovação dos requisitos do inversor, realizada a partir dos pontos anteriores. Observa-se que para todas as zonas bioclimáticas é possível fazer a conexão em série do total de MF requeridos, sem ultrapassar a tensão de operação do SPPM. De igual maneira, comprovou-se que a corrente do MF não ultrapassa a máxima do inversor.

Tabela 67: Comprovação da tensão e corrente dos inversores
 Fonte: (ECOSOLYS, 2020a; ECOSOLYS, 2020b; RENOVARES, 2020)

	ZB1	ZB2	ZB3	ZB4	ZB5	ZB6	ZB7	ZB8
V_{ocTmin}	45,45	45,39	44,66	45,13	44,55	45,65	43,94	42,73
V_{imax}	450	450	320	320	450	450	480	450
Nº mod série máx	9	9	7	7	10	9	10	10
$V_{iSPPMmin}$	70	70	48	48	70	70	180	70
$V_{iSPPMmax}$	450	450	320	320	450	450	480	450
V_{mpTmax}	28,75	28,24	28,22	28,43	28,01	28,01	27,95	28,67
V_{mpTmin}	36,65	36,59	36,01	36,38	35,91	36,80	35,42	34,45
$V_{iSPPMmin}/V_{mpTmax}$	2,43	2,48	1,70	1,69	2,50	2,50	6,44	2,44
	< Nº MF série <							
$V_{iSPPMmax}/V_{mpTmin}$	12,28	12,30	8,89	8,79	12,53	12,23	13,55	13,06
I_{imax}	10	10	11,5	11,5	10	10	11,5	10
I_{sc}	9,34	9,34	9,34	9,34	9,34	9,34	9,34	9,34
Nº seriesFV paralelo	1,07	1,07	1,23	1,23	1,07	1,07	1,23	1,07

Para determinar a produção de energia dos SFVs dimensionados, os mesmos foram simulados no programa SAM. Para a modelagem foi necessário fornecer ao programa as seguintes informações:

- Arquivo climático: Foram empregados os mesmos arquivos climáticos do EnergyPlus, provenientes da base SWERA (DOE; BTO; NREL, 2019);
- Especificações do MF: Foi selecionado o modelo de módulo CS6U-325P da base de dados do programa;
- Especificações do inversor: ingressadas manualmente a partir dos catálogos dos inversores;
- Arranjo do sistema: o total de MFs de cada sistema foi configurado em uma *string* conectada ao modelo de inversor correspondente;
- Inclinação dos MFs: igual à latitude;
- Perdas: foram consideradas as *default* do programa, perdas por sujeira, incompatibilidade e possível sombreamento = 5%; perdas DC = 4,44%; perdas AC = 1%;
- Taxa de degradação do sistema: *default* do programa = 0,5 %a.a.;
- Tcons = 40°C e Tarmaz = 45°C.

Os resultados das simulações são apresentados na seção 4.5.2.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. RESULTADOS DA DEFINIÇÃO DO MODELO BASE

Os resultados do consumo de eletricidade por classe do MB são apresentados na Tabela 68; onde a soma do consumo dos ventiladores, refrigeração e aquecimento totalizam o consumo em condicionamento de ar.

Tabela 68: Consumo de eletricidade anual do MB por zona bioclimática

	Equip. (kWh)	Ilum. (kWh)	Vent. (kWh)	Refr. (kWh)	Aquec. (kWh)	HVAC (kWh)	Constot _b (kWh)
CURITIBA - Z1	1.048	324	141	403	609	1.1'53	2.525
PELOTAS - Z2	1.048	326	185	702	646	1.533	2.907
FLORIANÓPOLIS - Z3	1.048	322	184	1.150	179	1.514	2.884
SÃO CARLOS - Z4	1.048	322	205	1.412	46	1.662	3.033
SANTOS - Z5	1.048	323	213	1.505	67	1.786	3.157
CAMPO GRANDE - Z6	1.048	317	318	2.238	17	2.572	3.937
CUIABÁ - Z7	1.048	318	492	3.522	6	4.020	5.386
SALVADOR - Z8	1.048	319	400	2.856	0	3.256	4.623

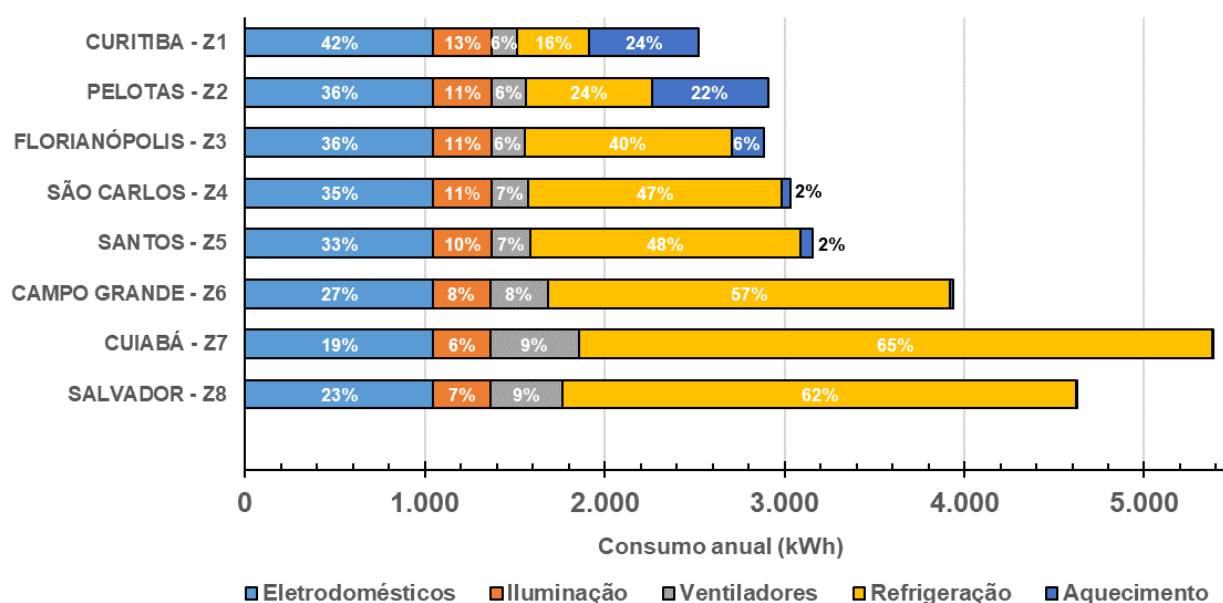


Figura 32: Consumo anual do MB por classe e zona bioclimática.

Na Figura 32 os mesmos resultados são apresentados de forma gráfica. Observa-se como a participação do ar condicionado para refrigeração aumenta de

acordo com a zona bioclimática e respectivas temperaturas médias mais elevadas (ver Figura 21). Da mesma forma, a participação do aquecimento é significativa nas zonas de temperatura média mais baixa, tornando-se progressivamente nula para aquelas mais quentes.

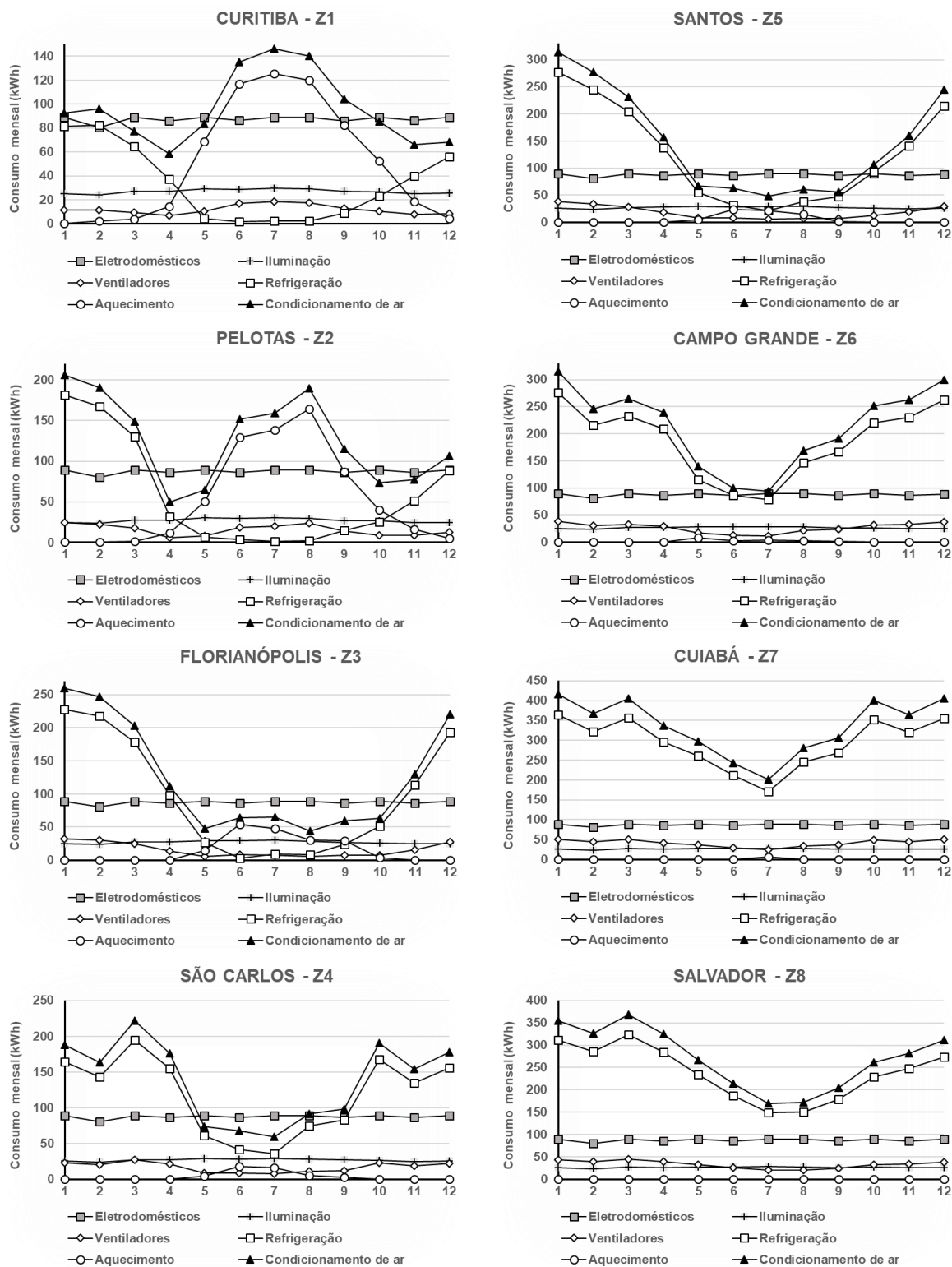


Figura 33: Consumo mensal do MB por classe e por zona bioclimática.

Na Figura 33 o consumo do MB é apresentado em maior detalhe, podendo ser apreciadas as variações mensais das diferentes classes ao longo do ano.

4.2. RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO BASEADA EM SIMULAÇÃO

4.2.1. Resultado da aplicação de diferentes algoritmos

A função objetivo consumo (ver equação (10)) foi minimizada para a ZB3, através da aplicação dos 8 algoritmos previamente apresentados na seção 3.7.3. Na Tabela 69 encontram-se os resultados dessa avaliação. A partir das reduções de consumo obtidas, observa-se que os algoritmos que apresentam melhor desempenho em relação à redução da função objetivo são o Nº 1 e o Nº 7, GPSHookeJeeves e GPSPSO CCHJMixed, respectivamente. Dado que a redução do consumo por parte de ambos algoritmos é praticamente igual, que o algoritmo Nº 1 só aceita variáveis contínuas e que as discretas foram ingressadas de maneira aproximada; o algoritmo escolhido para efetuar todas as otimizações do presente trabalho foi o Nº 7.

Tabela 69: Resultado da aplicação de diferentes tipos de algoritmos de otimização

Nº algoritmo	1	2	3	4	5	6	7	8
Algoritmo	GPSHooke Jeeves	NelderMead O'Neill	Discrete Armijo Gradient	PSOIW Mixed	PSOCC Mixed	PSOCC MeshMixed	GPSPSO CCHJMixed	GPSPSO CCHJReal
Consumo final (kWh)	2.485,8	2.511	2.592	2.544	2.544	2.532	2.486,3	2.493
Redução do Consumo	13,8%	12,9%	10,1%	11,8%	11,8%	12,2%	13,8%	13,6%
Tempo (h)	2:27	12:35	2:11	2:04	1:40	1:07	2:37	4:03
Valores das variáveis independentes que otimizam a função Cons								
e_cob (cm)	0,15	0,15	0,11	0,12	0,12	0,11	0,15	0,15
e_N_L (cm)	0,15	0,12	0,10	0,12	0,12	0,10	0,15	0,15
e_S_O (cm)	0,15	0,10	0,10	0,10	0,10	0,14	0,15	0,15
l_jan_O (m)	1,09	1,09	1,89	1,71	1,71	1,29	1,09	1,09
l_jan_E (m)	1,34	1,89	1,89	1,33	1,33	1,69	1,33	1,34
ang_bh_O (°)	90,0	104,9	90,1	109,8	109,8	100,0	90,0	90,0
ang_bh_E (°)	96,9	95,1	90,0	111,3	111,3	110,0	96,9	96,9
tv_tau (-)	0,886	0,882	0,886	0,886	0,886	0,886	0,886	0,886
azim (°)	93,8	86,2	120,8	95,0	95,0	90,0	93,8	93,8
tau_shade (-)	0,10	0,11	0,15	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
set_temp (°C)	20,3	19,3	15,1	19,7	19,7	20,0	20,0	20,3
ACH (ren/h)	5,0	2,2	1,0	3,2	3,2	3,5	1,0	5,0
abs (-)	0,20	0,20	0,20	0,26	0,26	0,25	0,20	0,20

Consumo do MB para a ZB3 = 2.884 kWh (Tabela 68)

Tabela 71: Resultados da minimização da função *Cons* por zona bioclimática

	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8
Constot _b (kWh)	2.525	2.907	2.884	3.033	3.157	3.937	5.386	4.623
Constot após OBS (kWh)	2.198	2.498	2.486	2.454	2.703	3.334	4.744	3.981
Redução (%)	13,0	14,1	13,8	19,1	14,4	15,3	11,9	13,9
Cons _b (ilum + HVAC) (kWh)	1.477	1.859	1.836	1.985	2.109	2.889	4.338	3.575
Cons (ilum + HVAC) após OBS (kWh)	1.150	1.450	1.438	1.406	1.655	2.286	3.696	2.933
Redução (%)	22,2	22,0	21,7	29,1	21,5	20,9	14,8	18,0
Cons _{HVAC} (kWh)	818,3	1117,2	1106,4	1076,3	1323,5	1953,2	3364,1	2602,8
Cons _{ilum} (kWh)	331,6	332,6	331,9	330,1	331,7	332,5	331,7	330,2
Valores das variáveis independentes que otimizam o <i>Cons</i>								
e_cob (cm); MB = 0,1 cm	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
e_N_L (cm); MB = 0,1 cm	0,15	0,15	0,15	0,07	0,15	0,07	0,15	0,07
e_S_O (cm); MB = 0,1 cm	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
l_jan_O (m); MB = 1,89 m	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09
l_jan_E (m); MB = 1,89 m	1,09	1,09	1,33	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89
ang_bh_O (°); MB = 90°	90,6	96,9	90,0	96,9	108,8	96,9	96,9	108,8
ang_bh_E (°); MB = 90°	90,0	90,0	96,9	96,9	101,9	90,0	90,0	96,9
azim (°); MB = 0°	303,8	285,0	93,8	86,3	86,3	86,3	86,3	285,0
set_temp (°C); MB = 15 °C	18,5	18,0	20,0	19,3	19,9	18,8	17,8	15,0
ACH (ren/h); MB = 1 ren/h	1,0	1,0	1,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
abs (-); MB = 0,3	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
tv_tau (-); MB = 0,886	0,886	0,886	0,886	0,886	0,886	0,886	0,886	0,886
tau_shade (-); MB = 0,4	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10

Na Tabela 72 foi calculada a diferença entre os valores das variáveis que minimizam a função *Cons* e aquelas que minimizam o dLCC. Através da tabela, nota-se que do total de variáveis, aquelas que maior diferença exercem entre o consumo derivado da minimização do dLCC e aquele minimizado diretamente, são as referentes à espessura do isolamento. Isto é lógico, já que para mudar o isolamento é requerido um investimento, enquanto o restante das variáveis não implica um custo inicial.

Tabela 72: Diferença entre os valores das variáveis que minimizam o Cons e os que minimizam o dLCC

	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8
e_cob (cm)	0,02	0,02	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
e_N_L (cm)	0,04	0,03	0,08	0	0,08	0	0,08	0
e_S_O (cm)	0,06	0,06	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
l_jan_O (m)	0	0	0	0	0	0	0	0
l_jan_E (m)	0	0	0,13	0	0,02	0	0	0
ang_bh_O (°)	0	0	0	0	0	-11,88	0	11,88
ang_bh_E (°)	0	0	0	0	0	0	0	6,88
azim (°)	0	0	0	0	0	0	0	198,8
set_temp (°C)	0	0	-0,25	-0,13	-0,13	-0,25	-0,25	-3,75
ACH (ren/h)	0	0	-4,00	0	0	0	0	0
abs (-)	0	0	0	0	0	0	0	0
tv_tau (-)	0	0	0	0	0	0	0	0
tau_shade (-)	0	0	0	0	0	0	0	0

Aa Figura 34 apresenta graficamente a redução do consumo fruto da minimização do dLCC (laranja) e a redução do consumo fruto da minimização direta do Cons (cinza). Como visto anteriormente, dado que não existe grande diferença entre as entradas que minimizam ambas as funções, a diferença do consumo também é pequena, tal qual mostra o gráfico. Observa-se também, que a classe que provoca uma redução expressiva no consumo é a climatização, sendo que a iluminação se mantém praticamente constante. Fazendo uma média para todas as zonas bioclimáticas, através do processo de otimização, o consumo total foi reduzido em 14% e o consumo em condicionamento de ar e iluminação 20%.

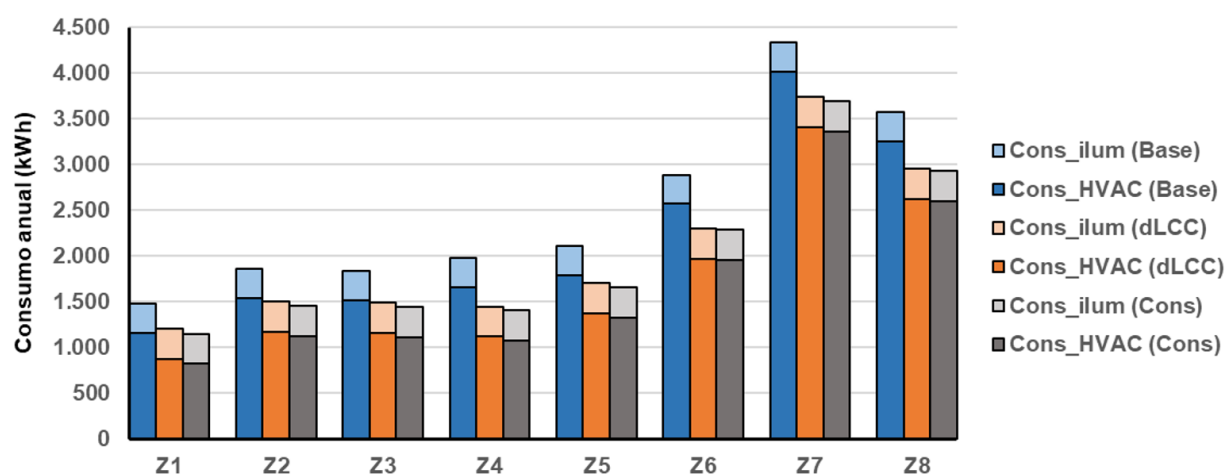


Figura 34: Consumo em iluminação e climatização antes e após a otimização das funções dLCC e Cons.

Dado que a variável tipo de vidro deu por resultado vidro simples para todas as zonas bioclimáticas, o custo de investimento e substituição em películas é nulo. Assim sendo, a única variável que modifica o investimento é o isolamento, consequentemente, a parcela do dLCC mais significativa é a poupança em energia (dE), como mostra a Figura 35.

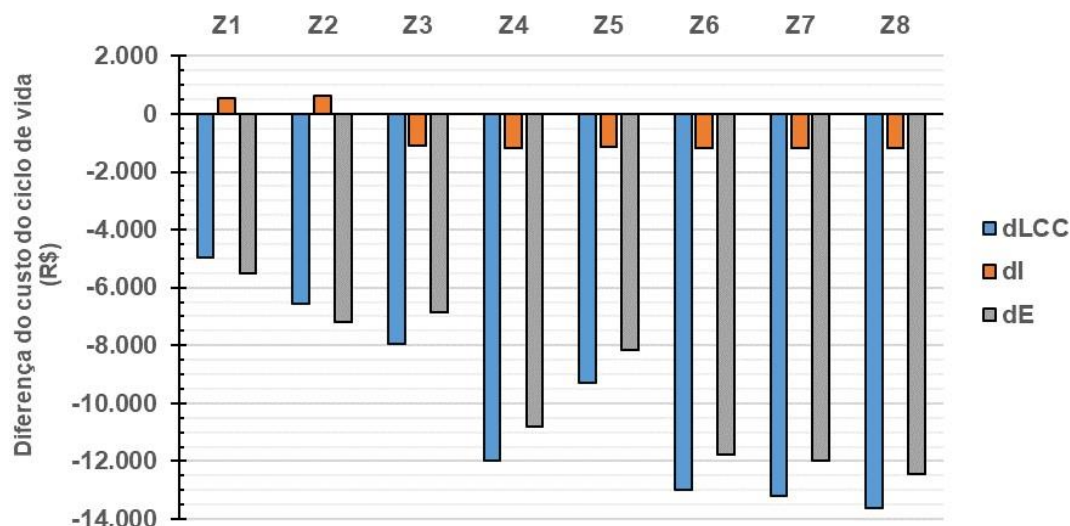


Figura 35: Diferença do custo do ciclo de vida (dLCC), investimento (dI) e energia (dE). $dI_{vid} + dSubs = 0$.

A Figura 36 exhibe o processo de otimização correspondente à ZB8, a qual obteve o maior dLCC. Observa-se que o processo de otimização híbrido começa executando a otimização através do algoritmo PSO, e posteriormente, através do algoritmo GPSHookeJeeves, intensifica a busca do mínimo em torno das zonas quase ideais.

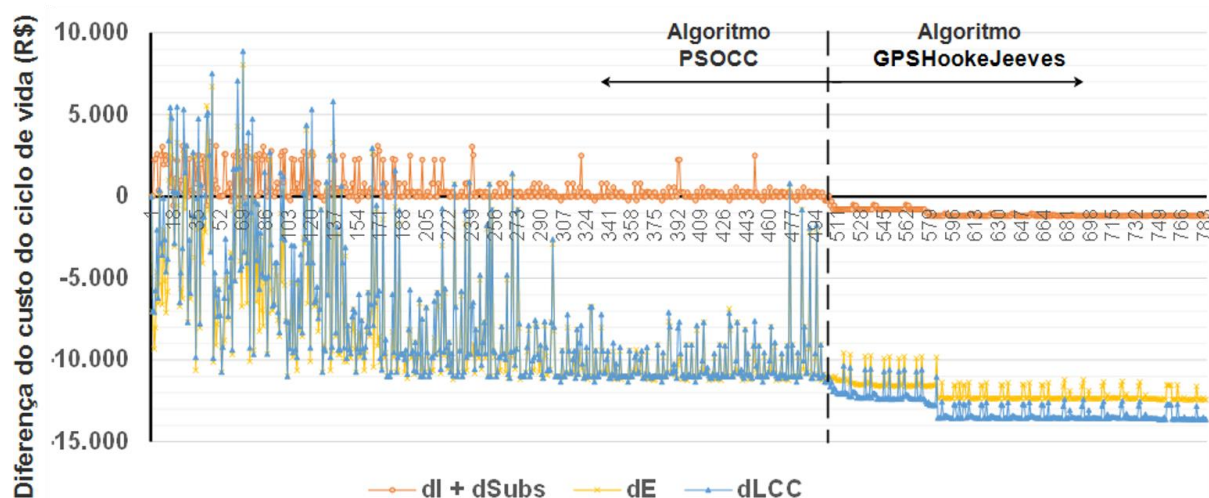


Figura 36: Minimização do dLCC para a zona bioclimática 8. $dLCC = dI + dSubs + dE$.

4.2.3. Resultados da comprovação da ventilação natural

Os campos destacados em negrito itálico da Tabela 73 indicam que não é possível manter a taxa de ventilação igual a 5 ren/h através da respectiva abertura, no mês correspondente. O processo de cálculo e maiores detalhes encontram-se disponíveis no item 3.8 da metodologia.

Tabela 73: Resultado do cálculo de %abertura

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
FLORIANÓPOLIS - ZB3												
%aberto, porta O (Z1 + Z5)	25%	38%	<i>53%</i>	36%	-	-	-	<i>92%</i>	33%	<i>52%</i>	33%	26%
%aberto, janela N (Z1 + Z5)	<i>117%</i>	<i>137%</i>	<i>148%</i>	<i>135%</i>	<i>342%</i>	<i>850%</i>	<i>148%</i>	<i>137%</i>	<i>119%</i>	<i>84%</i>	<i>80%</i>	<i>78%</i>
%aberto, janela S (Z4)	<i>62%</i>	50%	46%	45%	37%	42%	47%	46%	<i>72%</i>	46%	47%	<i>61%</i>
%aberto, janela N (Z2)	<i>69%</i>	<i>55%</i>	<i>51%</i>	49%	41%	46%	50%	48%	<i>80%</i>	35%	35%	39%
SÃO CARLOS - ZB4												
%aberto, porta O (Z1 + Z5)	22%	24%	25%	26%	24%	22%	22%	27%	27%	27%	26%	22%
%aberto, janela N (Z1 + Z5)	<i>110%</i>	<i>117%</i>	<i>121%</i>	<i>128%</i>	<i>123%</i>	<i>117%</i>	<i>118%</i>	<i>132%</i>	<i>121%</i>	<i>129%</i>	<i>119%</i>	<i>111%</i>
%aberto, janela S (Z4)	31%	32%	34%	40%	36%	33%	28%	<i>59%</i>	36%	38%	33%	30%
%aberto, janela N (Z2)	<i>54%</i>	<i>56%</i>	<i>60%</i>	<i>68%</i>	<i>62%</i>	<i>56%</i>	48%	<i>97%</i>	<i>62%</i>	<i>67%</i>	<i>59%</i>	<i>53%</i>
SANTOS - ZB5												
%aberto, porta O (Z1 + Z5)	23%	27%	27%	24%	26%	29%	21%	22%	23%	22%	25%	22%
%aberto, janela N (Z1 + Z5)	<i>117%</i>	<i>129%</i>	<i>131%</i>	<i>122%</i>	<i>128%</i>	<i>136%</i>	<i>118%</i>	<i>121%</i>	<i>118%</i>	<i>120%</i>	<i>123%</i>	<i>116%</i>
%aberto, janela S (Z4)	34%	40%	38%	34%	39%	38%	40%	34%	35%	41%	36%	35%
%aberto, janela N (Z2)	<i>60%</i>	<i>69%</i>	<i>66%</i>	<i>59%</i>	<i>67%</i>	<i>64%</i>	<i>66%</i>	<i>58%</i>	<i>59%</i>	<i>71%</i>	<i>62%</i>	<i>61%</i>
CAMPO GRANDE - ZB6												
%aberto, porta O (Z1 + Z5)	19%	24%	22%	26%	22%	20%	26%	24%	22%	20%	22%	24%
%aberto, janela N (Z1 + Z5)	44%	<i>53%</i>	<i>51%</i>	45%	<i>52%</i>	44%	41%	<i>67%</i>	<i>51%</i>	49%	<i>56%</i>	<i>62%</i>
%aberto, janela S (Z4)	25%	30%	29%	26%	30%	25%	24%	38%	29%	28%	32%	35%
%aberto, janela N (Z2)	<i>88%</i>	<i>111%</i>	<i>104%</i>	<i>104%</i>	<i>105%</i>	<i>96%</i>	<i>83%</i>	<i>115%</i>	<i>98%</i>	<i>97%</i>	<i>104%</i>	<i>113%</i>
CUIABÁ - ZB7												
%aberto, porta O (Z1 + Z5)	26%	24%	28%	27%	23%	27%	24%	43%	33%	37%	30%	28%
%aberto, janela N (Z1 + Z5)	<i>122%</i>	<i>120%</i>	<i>135%</i>	<i>128%</i>	<i>123%</i>	<i>137%</i>	<i>125%</i>	<i>142%</i>	<i>142%</i>	<i>148%</i>	<i>130%</i>	<i>132%</i>
%aberto, janela S (Z4)	34%	34%	40%	39%	42%	<i>53%</i>	38%	<i>65%</i>	<i>54%</i>	<i>53%</i>	39%	37%
%aberto, janela N (Z2)	<i>60%</i>	<i>59%</i>	<i>71%</i>	<i>67%</i>	<i>71%</i>	<i>87%</i>	<i>64%</i>	<i>113%</i>	<i>95%</i>	<i>96%</i>	<i>70%</i>	<i>67%</i>
SALVADOR - ZB8												
%aberto, porta O (Z1 + Z5)	36%	24%	20%	19%	20%	19%	21%	21%	25%	22%	21%	28%
%aberto, janela N (Z1 + Z5)	<i>101%</i>	<i>101%</i>	<i>98%</i>	<i>102%</i>	<i>104%</i>	<i>97%</i>	<i>104%</i>	<i>93%</i>	<i>97%</i>	<i>84%</i>	<i>84%</i>	<i>98%</i>
%aberto, janela S (Z4)	28%	32%	27%	31%	28%	26%	26%	25%	27%	24%	25%	27%
%aberto, janela N (Z2)	50%	<i>55%</i>	48%	<i>53%</i>	48%	44%	45%	43%	46%	43%	43%	47%

Os campos em cinza sinalizam que para as ZB3, ZB4 e ZB5 a ventilação natural não aplica no período 23/6 a 23/8 (Figura 27).

Para aqueles meses do ano em que, em determinado ambiente da casa, não foi possível manter a taxa de renovação de ar; o modelo de edificação otimizado foi corrigido substituindo o valor de 5ren/h por 1ren/h. Esses novos valores de consumo retificados são apresentados na Tabela 74. O novo modelo retificado foi chamado MO_{ACH} .

Tabela 74: Retificação do consumo do MO de acordo com a ventilação natural

	Constot_b (kWh)	Constot_{MO} (kWh)	Constot_{MO,ACH} (kWh)	Diferença entre MO e MO_{ACH} (%)
CURITIBA - Z1	2.525	2.251	2.251	-
PELOTAS - Z2	2.907	2.548	2.548	-
FLORIANÓPOLIS - Z3	2.884	2.541	2.540	-0,04%
SÃO CARLOS - Z4	3.033	2.494	2.501	0,28%
SANTOS - Z5	3.157	2.750	2.756	0,23%
CAMPO GRANDE - Z6	3.937	3.349	3.354	0,15%
CUIABÁ - Z7	5.386	4.787	4.791	0,08%
SALVADOR - Z8	4.623	4.002	4.004	0,06%

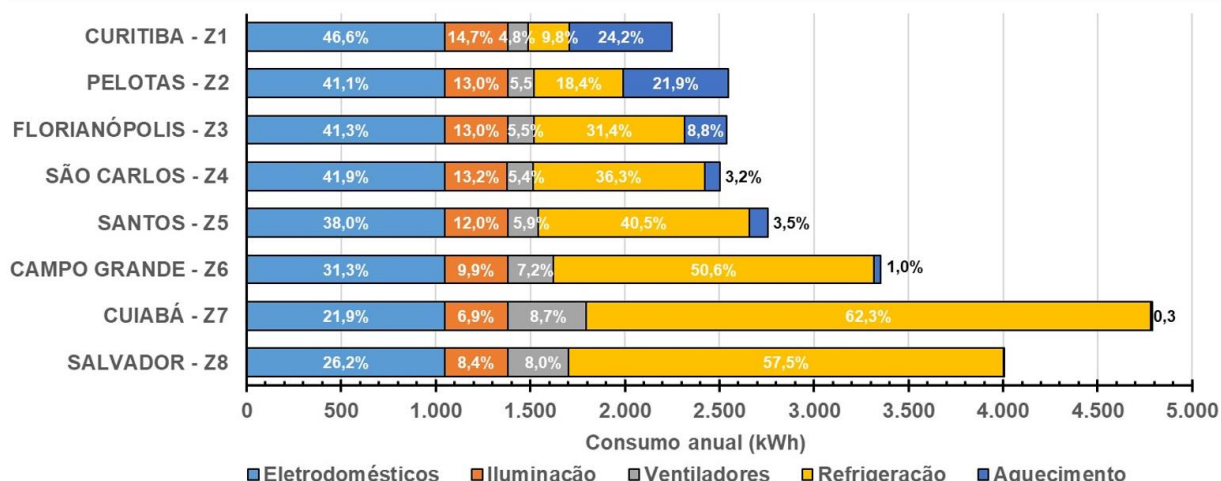
Observa-se que os novos valores de consumo retificados não sofreram alterações significativas, a diferença entre o consumo do MO e o consumo do MO_{ACH} não alcança a ser 1%. Isso se deve em parte, a que na maioria dos ambientes dos MOs é possível manter a taxa de ventilação igual a 5ren/h. Também, a que possivelmente a variável independente renovação de ar não é das que mais influenciam sobre a função consumo de energia.

4.2.4. Resultados do consumo do modelo otimizado retificado (MO_{ACH})

A Tabela 75 mostra os resultados do consumo anual do modelo otimizado retificado (MO_{ACH}) separados por classe. A mesma informação é apresentada em forma de gráfico na Figura 37. Comparando a participação de cada classe no consumo total do MO_{ACH} , com as porcentagens obtidas para o MB (Figura 32); observa-se que o consumo após a otimização permaneceu dividido em proporções similares.

Tabela 75: Consumo anual do MO_{ACH} por zona bioclimática

	Equip. (kWh)	Ilum. (kWh)	Vent. (kWh)	Refr. (kWh)	Aquec. (kWh)	HVAC (kWh)	Constot _{MOach} (kWh)
CURITIBA - Z1	1.048	332	107	221	543	871	2.251
PELOTAS - Z2	1.048	333	141	470	557	1.168	2.548
FLORIANÓPOLIS - Z3	1.048	332	140	796	223	1.160	2.540
SÃO CARLOS - Z4	1.048	330	136	908	80	1.123	2.501
SANTOS - Z5	1.048	332	163	1.117	96	1.377	2.756
CAMPO GRANDE - Z6	1.048	333	241	1.697	35	1.973	3.354
CUIABÁ - Z7	1.048	332	415	2.984	12	3.411	4.791
SALVADOR - Z8	1.048	334	319	2.303	0	2.622	4.004

Figura 37: Consumo anual do MO_{ACH} por classe e zona bioclimática.

4.3. RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO

Na Tabela 76 e Tabela 77 apresenta-se o resultado da avaliação das horas de conforto e desconforto térmico ao longo do ano, considerando os modelos de Fanger e adaptativo, respectivamente. Nesta etapa as simulações foram rodadas com o ar condicionado desligado, caso contrário, o próprio aparelho condicionador levaria o ambiente à condição de conforto. Trabalhou-se com a classe de aceitabilidade de 80% (ver Tabela 3). De acordo com essa classe, quando o PMV oferece por resultado um valor fora da faixa $-0,85 \leq \text{PMV} \leq +0,85$, contabiliza-se como desconforto. O EnergyPlus foi configurado para executar o balanço de energia a cada 10 minutos, portanto, se o PMV resultante do cálculo executado em 10 minutos deu por resultado um valor fora do intervalo, contabilizou como 1/6h de desconforto na Tabela 76. Da

mesma forma, quando a temperatura do ambiente (*thermostatic operative temperature*), calculada a cada 10 minutos, deu por resultado um valor diferente da temperatura operativa $\pm 3,5^\circ$ (*zone thermal comfort ASHRAE 55 Adaptive Model Temperature*); contabilizou como 1/6h de desconforto na Tabela 77.

Tabela 76: Avaliação das horas de conforto pelo modelo de Fanger

Ambiente da casa	Z1		Z2		Z4		Z5	
	MB	MO	MB	MO	MB	MO	MB	MO
CURITIBA - ZB1								
Desconforto (hs)	6.133	5.883	4.841	4.938	4.694	4.451	6.007	5.460
Desconforto (%)	70,0	67,2	55,3	56,4	53,6	50,8	68,6	62,3
Conforto (hs)	2.627	2.877	3.919	3.822	4.066	4.309	2.753	3.300
Conforto (%)	30,0	32,8	44,7	43,6	46,4	49,2	31,4	37,7
PELOTAS - ZB2								
Desconforto (hs)	6.089	5.955	5.271	4.980	5.220	4.660	6.170	5.562
Desconforto (%)	69,5	68,0	60,2	56,8	59,6	53,2	70,4	63,5
Conforto (hs)	2.671	2.805	3.489	3.780	3.540	4.100	2.590	3.198
Conforto (%)	30,5	32,0	39,8	43,2	40,4	46,8	29,6	36,5
FLORIANÓPOLIS - ZB3								
Desconforto (hs)	5.398	5.763	3.457	2.600	3.585	2.841	4.560	4.200
Desconforto (%)	61,6	65,8	39,5	29,7	40,9	32,4	52,1	47,9
Conforto (hs)	3.362	2.997	5.303	6.160	5.175	5.919	4.200	4.560
Conforto (%)	38,4	34,2	60,5	70,3	59,1	67,6	47,9	52,1
SÃO CARLOS - ZB4								
Desconforto (hs)	5.334	5.811	3.079	2.172	3.275	2.472	4.527	4.302
Desconforto (%)	60,9	66,3	35,1	24,8	37,4	28,2	51,7	49,1
Conforto (hs)	3.426	2.949	5.681	6.588	5.485	6.288	4.233	4.458
Conforto (%)	39,1	33,7	64,9	75,2	62,6	71,8	48,3	50,9
SANTOS - ZB5								
Desconforto (hs)	5.379	5.565	3.785	3.273	3.833	3.379	4.512	4.385
Desconforto (%)	61,4	63,5	43,2	37,4	43,8	38,6	51,5	50,1
Conforto (hs)	3.381	3.195	4.975	5.487	4.927	5.381	4.248	4.375
Conforto (%)	38,6	36,5	56,8	62,6	56,2	61,4	48,5	49,9
CAMPO GRANDE - ZB6								
Desconforto (hs)	5.490	5.376	4.862	3.620	5.281	3.532	4.911	4.106
Desconforto (%)	62,7	61,4	55,5	41,3	60,3	40,3	56,1	46,9
Conforto (hs)	3.270	3.384	3.898	5.140	3.479	5.228	3.849	4.654
Conforto (%)	37,3	38,6	44,5	58,7	39,7	59,7	43,9	53,1
CUIABÁ - ZB7								
Desconforto (hs)	7.269	6.241	7.546	7.126	7.712	7.035	6.740	5.378
Desconforto (%)	83,0	71,2	86,1	81,3	88,0	80,3	76,9	61,4
Conforto (hs)	1.491	2.519	1.214	1.634	1.048	1.725	2.020	3.382
Desconforto (%)	17,0	28,8	13,9	18,7	12,0	19,7	23,1	38,6
SALVADOR - ZB8								
Desconforto (hs)	5.272	5.081	6.308	4.814	6.354	4.846	4.943	3.869
Desconforto (%)	60,2	58,0	72,0	55,0	72,5	55,3	56,4	44,2
Conforto (hs)	3.488	3.679	2.452	3.946	2.406	3.914	3.817	4.891
Desconforto (%)	39,8	42,0	28,0	45,0	27,5	44,7	43,6	55,8

1 ano = 8.760 h

Tabela 77: Avaliação das horas de conforto pelo método adaptativo

Ambiente da casa	Z1		Z2		Z4		Z5	
	MB	MO	MB	MO	MB	MO	MB	MO
CURITIBA - ZB1								
Desconforto (hs)	5.083	4.836	2.648	2.373	2.338	1.743	4.255	3.548
Desconforto (%)	58,0	55,2	30,2	27,1	26,7	19,9	48,6	40,5
Conforto (hs)	3.677	3.924	6.112	6.387	6.422	7.017	4.505	5.213
Conforto (%)	42,0	44,8	69,8	72,9	73,3	80,1	51,4	59,5
PELOTAS - ZB2								
Desconforto (hs)	4.873	4.648	2.824	2.509	2.689	1.889	4.252	3.484
Desconforto (%)	55,6	53,1	32,2	28,6	30,7	21,6	48,5	39,8
Conforto (hs)	3.887	4.112	5.936	6.252	6.072	6.871	4.508	5.276
Conforto (%)	44,4	46,9	67,8	71,4	69,3	78,4	51,5	60,2
FLORIANÓPOLIS - ZB3								
Desconforto (hs)	4.404	4.660	1.777	942	1.936	1.014	3.518	2.735
Desconforto (%)	50,3	53,2	20,3	10,8	22,1	11,6	40,2	31,2
Conforto (hs)	4.356	4.100	6.983	7.818	6.824	7.746	5.242	6.025
Conforto (%)	49,7	46,8	79,7	89,2	77,9	88,4	59,8	68,8
SÃO CARLOS - ZB4								
Desconforto (hs)	4.300	4.667	1.776	703	1.974	926	3.446	2.814
Desconforto (%)	49,1	53,3	20,3	8,0	22,5	10,6	39,3	32,1
Conforto (hs)	4.460	4.093	6.984	8.057	6.786	7.834	5.314	5.946
Conforto (%)	50,9	46,7	79,7	92,0	77,5	89,4	60,7	67,9
SANTOS - ZB5								
Desconforto (hs)	4.013	4.266	1.541	837	1.683	1.020	2.970	2.713
Desconforto (%)	45,8	48,7	17,6	9,6	19,2	11,6	33,9	31,0
Conforto (hs)	4.747	4.494	7.219	7.923	7.077	7.740	5.791	6.047
Conforto (%)	54,2	51,3	82,4	90,4	80,8	88,4	66,1	69,0
CAMPO GRANDE - ZB6								
Desconforto (hs)	4.322	4.410	2.552	1.399	3.034	1.605	3.616	2.666
Desconforto (%)	49,3	50,3	29,1	16,0	34,6	18,3	41,3	30,4
Conforto (hs)	4.438	4.350	6.208	7.362	5.726	7.155	5.144	6.094
Conforto (%)	50,7	49,7	70,9	84,0	65,4	81,7	58,7	69,6
CUIABÁ - ZB7								
Desconforto (hs)	5.081	4.652	4.695	3.290	5.309	3.118	4.572	3.508
Desconforto (%)	58,0	53,1	53,6	37,6	60,6	35,6	52,2	40,0
Conforto (hs)	3.679	4.108	4.065	5.470	3.451	5.642	4.188	5.252
Desconforto (%)	42,0	46,9	46,4	62,4	39,4	64,4	47,8	60,0
SALVADOR - ZB8								
Desconforto (hs)	4.152	3.903	3.177	546	3.052	598	3.463	1.627
Desconforto (%)	47,4	44,5	36,3	6,2	34,8	6,8	39,5	18,6
Conforto (hs)	4.608	4.857	5.583	8.214	5.708	8.163	5.297	7.133
Desconforto (%)	52,6	55,5	63,7	93,8	65,2	93,2	60,5	81,4

1 ano = 8.760 h

Efetuada a média entre todos os ambientes da casa e para todas as zonas bioclimáticas, tem-se que através do processo de otimização, as horas de conforto aumentaram em 16%, quando aplicado o modelo de Fanger, e 15%, quando aplicado modelo adaptativo. Ademais, observa-se que para a maioria das zonas bioclimáticas, os ambientes da casa que proporcionam melhores índices de conforto térmico são o Z2 e Z4, isto se deve principalmente à orientação da edificação. Ambos ambientes,

no MB possuem fachadas e aberturas voltadas para o leste e após a otimização, voltadas para o sul (rotação de 90° para a maioria das zonas bioclimáticas); portanto recebem menor irradiação solar e são mais confortáveis do ponto de vista térmico.

Para melhor visualização, a Figura 38 mostra os mesmos resultados em forma de gráficos. Nos gráficos, as barras à esquerda correspondem ao MB e à direita ao MO_{ACH}. Observa-se que as zonas bioclimáticas 3, 4, 5 e 6, são as que apresentaram as maiores porcentagens médias anuais de horas de conforto; em conformidade com as temperaturas médias anuais mais moderadas características de ditas zonas. Além disso, nota-se uma diferença considerável nos resultados, entre aplicar o modelo de Fanger e o modelo adaptativo. De acordo com o modelo adaptativo, a média de horas de conforto anuais de todas as zonas bioclimáticas para o MO_{ACH} é 67%, enquanto para o modelo de Fanger é 47%. Essa diferença nos resultados se deve ao modelo adaptativo reconhecer a capacidade de adaptação térmica do ser humano ao ambiente interno, assim como fatores psicológicos e interação do usuário com o entorno. Dessa forma, os ocupantes podem sentir o calor como sendo menos severo do que previsto pelo modelo Fanger e consequentemente, os períodos de conforto calculados aplicando o modelo adaptativo são maiores.

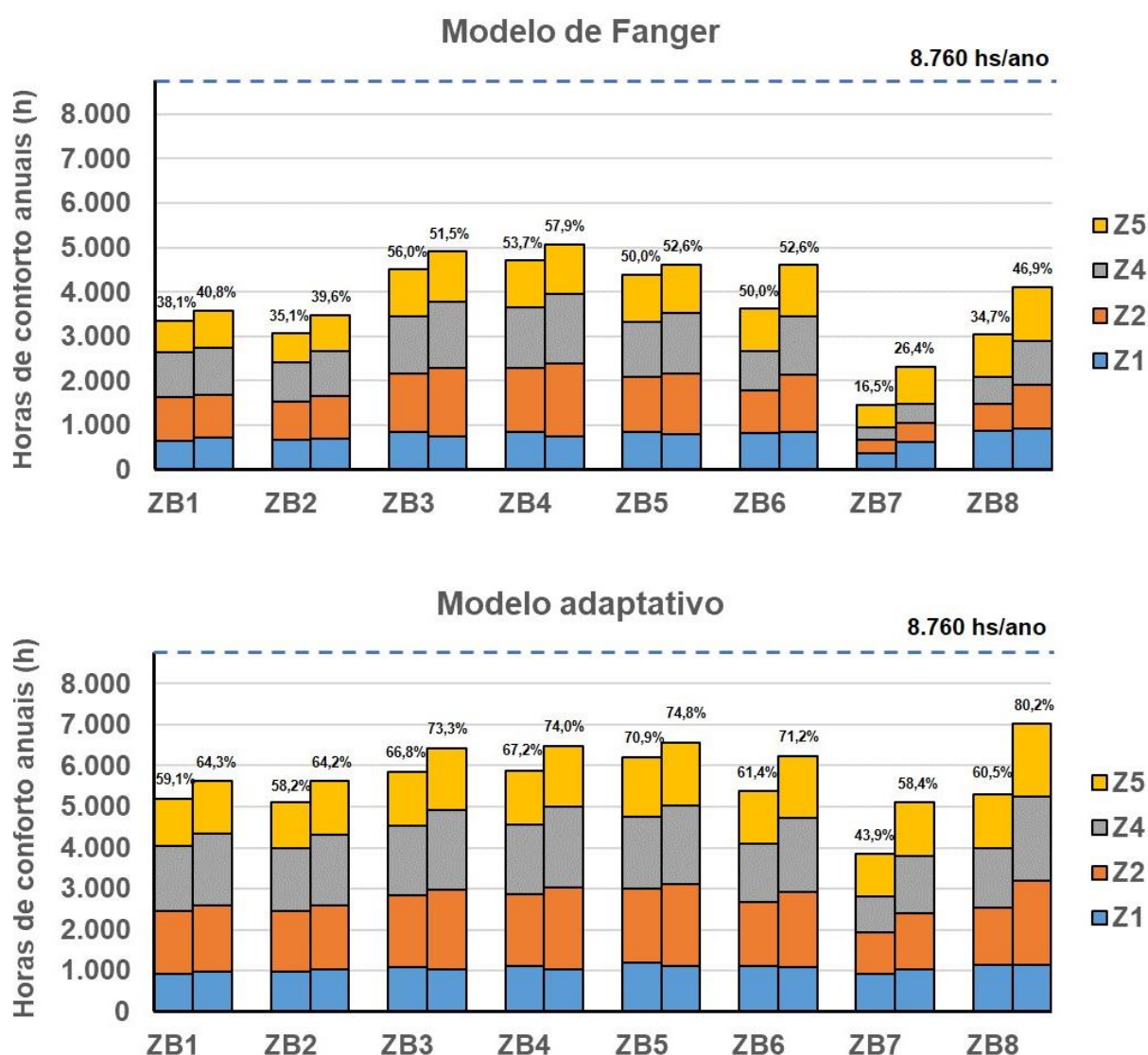


Figura 38: Horas de desconforto anuais calculadas pelos modelos de Fanger e adaptativo (Z1, Z2, Z4 e Z5 = ambientes da casa, ver Figura 16).

4.3.1. Consumo do modelo otimizado com conforto (MOC)

Os resultados do cálculo do consumo energético do MOC, utilizado como ponto de ajuste do termostato a linha central do modelo de conforto adaptativo (*AdaptiveASH55CentralLine*), encontram-se na Tabela 78. Verifica-se através dos resultados que, um edifício projetado de acordo com as faixas de conforto sugeridas pelo modelo adaptativo, consome uma quantidade de energia significativamente menor. No modelo adaptativo, a diminuição do consumo é produto da diminuição na refrigeração, sendo que a energia necessária para aquecimento permanece constante. Isto pode ser apreciado na Figura 39, a qual apresenta de forma

comparativa os consumos em condicionamento de ar, separados em ventilação, refrigeração e aquecimento; para o MB, MO_{ACH} e MOC. Observa-se que nas zonas bioclimáticas com temperaturas médias anuais mais elevadas, nas quais a maior parte do consumo em condicionamento de ar provém da refrigeração; o gasto em HVAC diminui na ordem de 27 a 37% do MO para o MOC. Já para as zonas bioclimáticas com temperaturas médias anuais mais baixas, a diminuição é da ordem de 10%.

Tabela 78: Consumo anual do modelo otimizado com conforto em comparação aos outros modelos

	Constot _b (kWh)	Constot _{MO,ACH} (kWh)	Constot _{MOC} (kWh)	Diferença entre MB e MOC (%)	Diferença entre MO _{ACH} e MOC (%)
CURITIBA - Z1	2.525	2.251	2.193	13,2%	2,6%
PELOTAS - Z2	2.907	2.548	2.405	17,3%	5,6%
FLORIANÓPOLIS - Z3	2.884	2.540	2.220	23,0%	12,6%
SÃO CARLOS - Z4	3.033	2.501	2.193	27,7%	12,3%
SANTOS - Z5	3.157	2.756	2.361	25,2%	14,3%
CAMPO GRANDE - Z6	3.937	3.354	2.708	31,2%	19,3%
CUIABÁ - Z7	5.386	4.791	3.769	30,0%	21,3%
SALVADOR - Z8	4.623	4.004	3.028	34,5%	24,4%

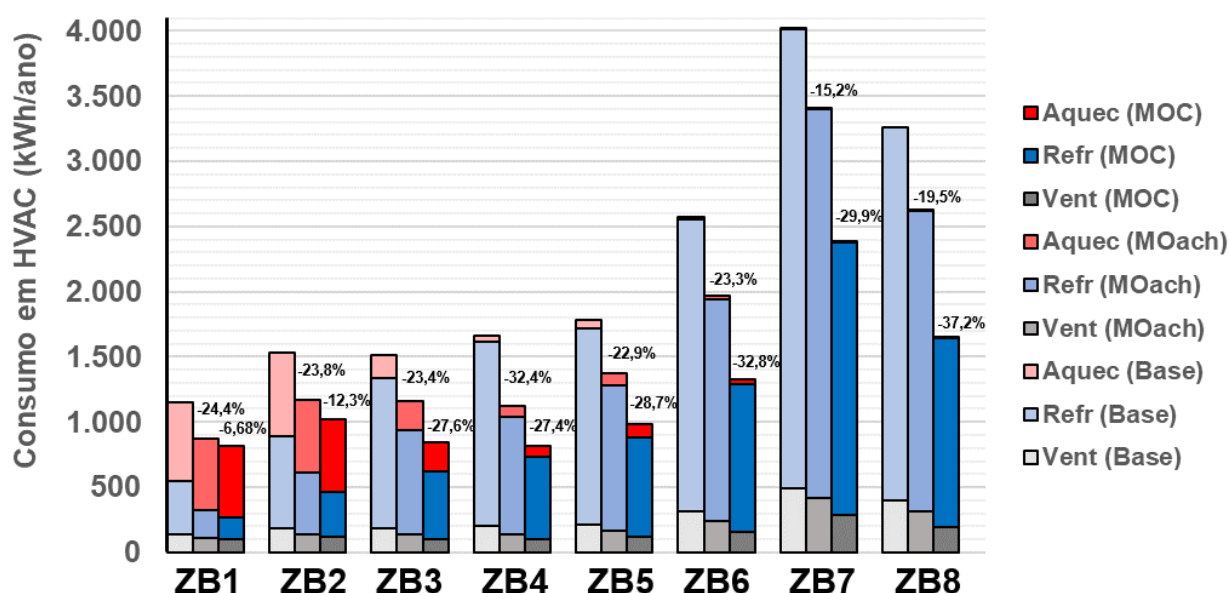


Figura 39: Consumo em condicionamento de ar do MOC em comparação aos outros modelos.

4.4. RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO DO SAS

A partir da metodologia previamente explicada em 3.10.2, chegou-se nos resultados da Tabela 79. Observa-se que os resultados da área coletora obtidos

através do método de simulação, para as zonas bioclimáticas 1, 2, 3 e 7, aproximam-se razoavelmente aos obtidos através da metodologia manual da NBR15569. No entanto, para as zonas bioclimáticas 4, 5, 6 e 8, a área coletora obtida pelo método de simulação é bem menor da estimada através da norma. A área coletora obtida mediante simulação, mesmo sendo pequena, consegue cobrir quase por completo a demanda energética anual; isto percebe-se através da fração solar, que deu por resultados valores próximos de 98%. Assim sendo, constatou-se que os resultados da NBR15569, em ocasiões, podem levar ao superdimensionamento da área coletora do SAS.

Tabela 79: Resultado do dimensionamento do SAS

	CURITIBA- ZB1			PELOTAS - ZB2			FLORIANÓPOLIS - ZB3			SÃO CARLOS - ZB4		
Acoletora NBR 15569 (m²)	4,29			3,98			3,69			3,02		
Modelo - RSC	1000T x1	1400T x1	2000T x1	1000T x1	1400T x1	2000T x1	1000T x1	1400T x1	2000T x1	1000T x1	1400T x1	2000T x1
Acoletora (m²)	0,99	1,39	1,99	0,99	1,39	1,99	0,99	1,39	1,99	0,99	0,99	1,39
Q_ auxiliar (kWh)	1.387	945	534	1.121	720	414	903	504	225	411	116	31
Q_ total (kWh)	2.711	2.711	2.711	2.581	2.581	2.581	2.217	2.217	2.217	2.079	2.079	2.079
f (%)	0,49	0,65	0,80	0,57	0,72	0,84	0,59	0,77	0,90	0,80	0,94	0,99
I (R\$)	2.302	2.417	2.571	2.302	2.417	2.571	2.302	2.417	2.571	2.302	2.417	2.571
VPL (R\$)	13.245	18.324	22.994	14.846	19.434	22.873	13.127	17.702	20.812	17.284	20.635	21.486
	x2	x2	x2	x2	x2	x2	x2	x2	x2	x2	x2	x2
Acoletora (m²)	1,98	2,78	3,97	1,98	2,78	3,97	1,98	2,78	3,97	1,98	1,98	2,78
Q_ auxiliar (kWh)	549	312	192	427	207	77	234	120	72	32	14	9
Q_ total (kWh)	2.711	2.711	2.711	2.581	2.581	2.581	2.217	2.217	2.217	2.079	2.079	2.079
f (%)	0,80	0,88	0,93	0,83	0,92	0,97	0,89	0,95	0,97	0,98	0,99	1,00
I (R\$)	2.821	3.052	3.361	2.821	3.052	3.361	2.821	3.052	3.361	2.821	3.052	3.361
VPL (R\$)	22.565	25.120	26.221	22.477	24.825	26.043	20.461	21.574	21.830	21.214	21.195	20.946
	x3	x3	x3	x3	x3	x3	x3	x3	x3	x3	x3	x3
Acoletora (m²)	2,97	4,16	5,96	2,97	4,16	5,96	2,97	4,16	5,96	2,97	2,97	4,16
Q_ auxiliar (kWh)	285	183	116	177	69	28	108	68	39	13	9	5
Q_ total (kWh)	2.711	2.711	2.711	2.581	2.581	2.581	2.217	2.217	2.217	2.079	2.079	2.079
f (%)	0,89	0,93	0,96	0,93	0,97	0,99	0,95	0,97	0,98	0,99	0,996	0,998
I (R\$)	3.341	3.687	4.150	3.341	3.687	4.150	3.341	3.687	4.150	3.341	3.687	4.150
VPL (R\$)	25.146	26.007	26.330	24.886	25.805	25.829	21.422	21.550	21.427	20.921	20.622	20.211
	SANTOS - ZB5			CAMPO GRANDE - ZB6			CUIABÁ - ZB7			SALVADOR - ZB8		
Acoletora NBR 15569 (m²)	3,83			2,71			2,36			2,52		
Modelo - RSC	1000T x1	1400T x1	2000T x1	1000T x1	1400T x1	2000T x1	1000T x1	1400T x1	2000T x1	1000T x1	1400T x1	2000T x1
Acoletora (m²)	1,99	0,99	1,39	1,99	0,99	0,99	1,39	1,99	0,99	1,39	1,99	0,99
Q_ auxiliar (kWh)	699	329	115	341	93	28	149	45	20	360	133	33
Q_ total (kWh)	2.055	2.055	2.055	1.756	1.756	1.756	1.382	1.382	1.382	1.581	1.581	1.581
f (%)	0,66	0,84	0,94	0,81	0,95	0,98	0,89	0,97	0,99	0,77	0,92	0,98
I (R\$)	2.302	2.417	2.571	2.302	2.417	2.571	2.302	2.417	2.571	2.302	2.417	2.571
VPL (R\$)	13.626	17.852	20.217	14.310	17.112	17.721	12.181	13.287	13.427	12.040	14.581	15.607
	x2	x2	x2	x2	x2	x2	x2	x2	x2	x2	x2	x2
Acoletora (m²)	3,97	1,98	2,78	3,97	1,98	1,98	2,78	3,97	1,98	2,78	3,97	1,98
Q_ auxiliar (kWh)	120	48	23	29	12	7	20	11	5	35	7	0
Q_ total (kWh)	2.055	2.055	2.055	1.756	1.756	1.756	1.382	1.382	1.382	1.581	1.581	1.581
f (%)	0,94	0,98	0,99	0,98	0,99	1,00	0,99	0,99	1,00	0,98	1,00	1,00
I (R\$)	2.821	3.052	3.361	2.821	3.052	3.361	2.821	3.052	3.361	2.821	3.052	3.361
VPL (R\$)	19.898	20.516	20.506	17.455	17.424	17.180	13.171	13.046	12.806	15.328	15.436	15.202
	x3	x3	x3	x3	x3	x3	x3	x3	x3	x3	x3	x3
Acoletora (m²)	5,96	2,97	4,16	5,96	2,97	2,97	4,16	5,96	2,97	4,16	5,96	2,97
Q_ auxiliar (kWh)	42	21	13	11	7	6	10	5	3	5	0	0
Q_ total (kWh)	2.055	2.055	2.055	1.756	1.756	1.756	1.382	1.382	1.382	1.581	1.581	1.581
f (%)	0,98	0,99	0,99	0,99	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
I (R\$)	3.341	3.687	4.150	3.341	3.687	4.150	3.341	3.687	4.150	3.341	3.687	4.150
VPL (R\$)	20.299	20.199	19.833	17.153	16.856	16.402	12.769	12.483	12.043	15.171	14.877	14.416

4.4.1. Retificação do consumo para aquecimento de água

Para definir as cargas internas, na seção 3.4.3, tinha sido considerado que 20% da demanda do chuveiro com potência igual a 4.500W era suprida com energia elétrica e 80% com energia solar (Tabela 25). A partir dos resultados do dimensionamento e simulação do SAS, nesta etapa foi possível estimar com maior certeza a energia elétrica auxiliar necessária para complementar o SAS. Na Tabela 80 acha-se a energia elétrica auxiliar junto aos novos valores de consumo em equipamentos elétricos retificados. A primeira linha da tabela indica o consumo em equipamentos elétricos considerado inicialmente para a definição do MB. Na segunda linha, encontra-se o consumo em equipamentos após subtrair o consumo que tinha sido estimado para o chuveiro. Juntamente, para cada ZB, apresenta-se a energia auxiliar simulada a partir da configuração do SAS definida na Tabela 79 (Q_auxiliar). E por fim, o consumo em equipamentos elétricos retificado (Equip') calculou-se pela equação: Equipamentos – Chuveiro + Q_auxiliar.

Tabela 80: Consumo em aquecimento de água e retificação do consumo em equipamentos elétricos

		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
Equipamentos (kWh)		89,0	80,4	89,0	86,1	89,0	86,2	89,0	89,0	86,1	89,0	86,2	89,0	1.048
Equipamentos – chuveiro (kWh)		74,4	65,8	74,4	71,5	74,4	71,6	74,4	74,4	71,5	74,4	71,6	74,4	873
ZB1	Q_auxiliar	0,4	7,5	1,1	5,9	20,3	10,5	47,1	15,8	43,6	26,6	10,8	2,5	192
	Equip' (kWh)	74,8	73,3	75,5	77,4	94,8	82,0	121,5	90,3	115,1	101,0	82,3	76,9	1.065
ZB2	Q_auxiliar	0,0	0,1	0,0	2,9	7,1	16,4	21,6	13,7	3,9	11,2	0,0	0,0	77
	Equip' (kWh)	74,4	65,8	74,4	74,5	81,5	87,9	96,1	88,2	75,4	85,6	71,6	74,4	950
ZB3	Q_auxiliar	0,0	0,1	0,0	3,5	6,8	17,8	42,2	16,8	24,5	5,4	1,8	0,9	120
	Equip' (kWh)	74,4	65,9	74,4	75,0	81,2	89,3	116,6	91,2	96,0	79,8	73,4	75,3	992
ZB4	Q_auxiliar	0,5	2,9	0,2	0,1	4,4	10,9	4,7	0,0	2,4	0,0	2,9	1,5	31
	Equip' (kWh)	75,0	68,7	74,6	71,6	78,8	82,5	79,1	74,4	73,9	74,4	74,4	75,9	903
ZB5	Q_auxiliar	0,0	0,5	4,4	1,6	7,1	23,3	45,1	21,1	5,2	3,0	3,1	0,3	115
	Equip' (kWh)	74,4	66,3	78,8	73,1	81,5	94,8	119,5	95,6	76,7	77,4	74,7	74,7	987
ZB6	Q_auxiliar	0,0	1,0	0,9	1,3	0,2	8,8	10,3	2,2	0,6	0,5	1,2	0,9	28
	Equip' (kWh)	74,4	66,8	75,3	72,8	74,6	80,3	84,8	76,6	72,1	74,9	72,8	75,3	901
ZB7	Q_auxiliar	0,0	0,0	0,2	3,6	7,9	8,2	12,7	5,2	4,7	1,5	0,6	0,0	45
	Equip' (kWh)	74,4	65,8	74,7	75,1	82,3	79,8	87,1	79,6	76,2	76,0	72,1	74,4	917
ZB8	Q_auxiliar	0,0	0,0	0,0	0,1	3,5	15,3	11,0	3,1	0,0	0,0	0,0	0,0	33
	Equip' (kWh)	74,4	65,8	74,4	71,6	77,9	86,9	85,4	77,5	71,5	74,4	71,6	74,4	906

Devido a que o consumo em equipamentos elétricos foi retificado, foi necessário também, retificar o consumo total. Para o caso do MOC, o consumo final retificado calculou-se pela equação:

$$Constot_{MOC,SAS} = Constot_{MOC} - Equipamentos + Equipamentos' \quad (66)$$

Onde,

$Constot_{MOC,SAS}$ = Consumo do MOC retificado, considerando a energia elétrica auxiliar simulada para o SAS;

$Constot_{MOC}$ = Consumo do MOC original;

$Equipamentos$ = Consumo em equipamentos original, o qual considerava o uso de um chuveiro com potência igual a 4.500W e fração solar de 80%;

$Equipamentos'$ = Consumo em equipamentos retificado, considerando o consumo auxiliar do SAS simulado.

O resultado do consumo do MOC retificado de acordo com o consumo auxiliar do SAS (MOC_{SAS}), encontra-se na Tabela 81. Os valores da tabela são os utilizados no dimensionamento dos SFs.

Tabela 81: Consumo do MOC considerando o SAS

$Constot_{MOC,SAS}$ (kWh/mês)	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total (kWh/ano)
ZB1	149,3	140,3	132,9	141,2	194,6	226,5	281,6	245,1	231,4	190,8	143,2	132,8	2209,7
ZB2	212,1	191,1	171,3	136,4	165,1	243,2	257,2	280,9	204,8	169,3	137,5	137,4	2306,4
ZB3	247,1	220,2	163,4	126,9	142,2	192,0	213,4	164,1	171,6	136,2	168,2	219,6	2164,8
ZB4	212,6	159,0	210,0	173,7	140,5	163,1	153,9	154,3	141,2	194,4	158,9	186,9	2048,6
ZB5	291,3	242,5	210,2	172,4	134,6	172,1	190,6	172,0	133,8	154,7	181,3	244,8	2300,3
ZB6	280,8	202,8	219,9	205,3	165,4	157,6	167,7	202,2	208,3	232,1	252,3	266,0	2560,3
ZB7	382,0	317,5	350,5	303,7	288,6	222,9	252,7	274,5	256,7	335,0	302,7	352,1	3638,9
ZB8	320,8	270,8	304,6	274,4	235,2	210,8	180,4	174,4	189,7	221,5	237,1	266,3	2886,1

4.5. RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO DOS SFVs

4.5.1. Sistemas fotovoltaicos isolados (SFIs)

A Tabela 82 resume o resultado do dimensionamento pelo método do mês crítico dos SFIs por ZB. Ademais, traz o valor do investimento (I) por elemento. Para o cálculo dos investimentos, foram considerados os custos unitários por elemento do

sistema, apresentados na Tabela 83. O investimento em baterias, I baterias', incorpora também o custo de substituição, o qual foi calculado considerando a inflação ($i = 3,75\% \text{ a.a.}$), a taxa de desconto nominal ($D = 9,356\% \text{ a.a.}$), um horizonte de projeto de 20 anos e vida útil das baterias de 5 anos. A vida útil de 5 anos foi estimada a partir do *datasheet* do fabricante, que garante, para profundidade de descarga igual a 25%, uma vida útil de 1.200 ciclos.

Tabela 82: Resultados do dimensionamento dos SFIs

	ZB1	ZB2	ZB3	ZB4	ZB5	ZB6	ZB7	ZB8
NM	16	18	12	9	12	12	18	12
Pm (kWp)	5,20	5,85	3,90	2,93	3,90	3,90	5,85	3,90
I módulos (R\$)	11.747	13.215	8.810	6.608	8.810	8.810	13.215	8.810
N° de baterias	48	60	48	30	60	40	60	60
I baterias (R\$)	53.077	66.346	53.077	33.173	66.346	44.231	66.346	66.346
I baterias' (R\$)*	149.337	186.672	149.337	93.336	186.672	124.448	186.672	186.672
N° controladores	2 x NC °3	3 x NC °3	2 x NC °3	3 x NC °1	3 x NC °3	2 x NC °3	3 x NC °3	3 x NC °3
I controladores (R\$)	3.518	5.277	3.518	2.127	5.277	3.518	5.277	5.277
N° inversores (R\$)	2 x NI °2	2 x NI °1 1 x NI °2	2 x NI °2	2 x NI °3 1 x NI °4	2 x NI °1 1 x NI °2	2 x NI °2	2 x NI °1 1 x NI °2	2 x NI °1 1 x NI °2
I inversores (R\$)	8.578	9.087	8.578	10.667	9.087	8.578	9.087	9.087
Custos complementares (R\$)	6.071	6.662	5.194	5.160	5.346	5.194	6.662	5.346
TOTAL (R\$)	179.251	220.913	175.437	117.897	215.192	150.548	220.913	215.192

*Considera o custo em substituição a cada 5 anos

Tabela 83: Custos dos insumos do SFI

Fonte: (DANTAS, POMPERMAYER, 2018; NEOSOLAR, 2020a; SOLAR, 2020)

Módulo CS6U-325P (R\$)	734,18
Bateria 12MF220 (R\$)	1105,77
Controladores	
Epver Triron 4210N (R\$) - NC °1	709
Epver Tracer 54150AN (R\$) - NC °3	1759
Inversores	
SHI2000-42 (R\$) - NI °1	2399
SHI3000-42 (R\$) - NI °2	4289
SHI2000-22 (R\$) - NI °3	3189
SHI3000-22 (R\$) - NI °4	4289
Estruturas + proteções + instalação (%)	23 % do total

Na Figura 40 encontra-se a composição dos custos de investimento dos SFIs, montada a partir dos valores calculados na Tabela 82. A partir do gráfico, percebe-se a enorme parcela que possuem as baterias dentro dos custos dos SFIs. Em parte, o

que faz com que o custo em baterias seja assim elevado, é a necessidade de substituição a cada 5 anos. Em média, quando considerada a substituição, o custo em baterias corresponde a 85% do total (I baterias'); ao passo que sem substituição (I baterias), a participação no total cai para 65%.

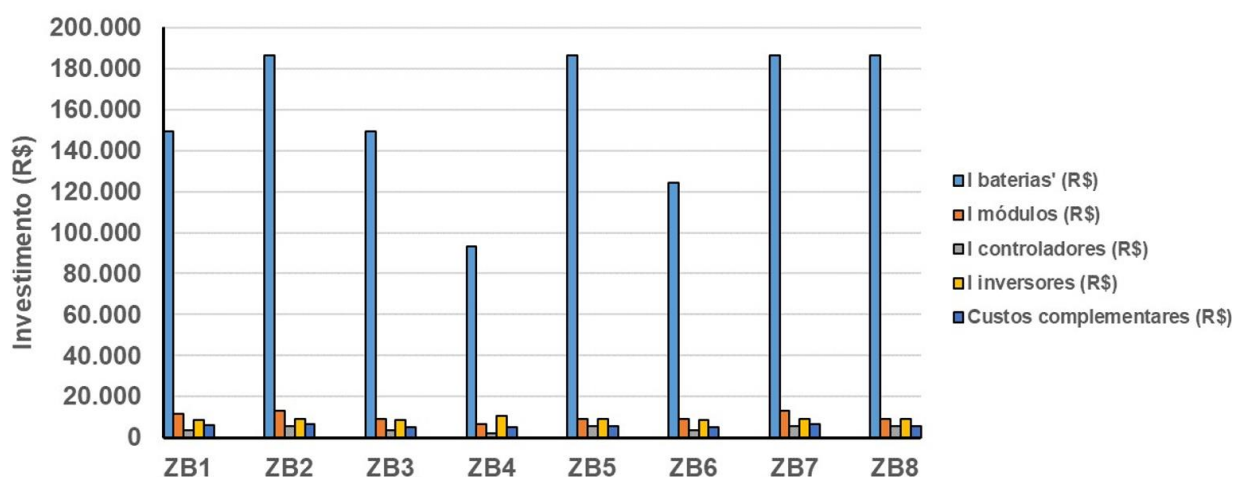


Figura 40: Composição dos custos dos SFIs

4.5.2. Sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCRs)

A Tabela 84 resume o resultado do dimensionamento dos SFCRs junto aos custos de investimento por componente do sistema. Os investimentos foram calculados a partir dos custos dos insumos da Tabela 85. Os custos complementares correspondem aos custos em estruturas, proteções e instalação, e foram estimados como sendo 23% do total (DANTAS, POMPERMAYER; 2018).

Tabela 84: Resultado do dimensionamento dos SFCRs

	ZB1	ZB2	ZB3	ZB4	ZB5	ZB6	ZB7	ZB8
NM	5	5	4	4	5	5	7	5
P_{EV} (kWp)	1,625	1,625	1,300	1,300	1,625	1,625	2,275	1,625
I módulos (R\$)	3.671	3.671	2.937	2.937	3.671	3.671	5.139	3.671
Inversor (R\$)	NI °1'	NI °1'	NI °2'	NI °2'	NI °1'	NI °1'	NI °3'	NI °1'
I inversores (R\$)	2.599	2.599	1.488	1.488	2.599	2.599	2.696	2.599
Custos complementares (R\$)	1.873	1.873	1.322	1.322	1.873	1.873	2.340	1.873
TOTAL (R\$)	8.143	8.143	5.746	5.746	8.143	8.143	10.176	8.143

Tabela 85: Custos dos insumos do SFCR
 Fonte: (ECOSOLYS, 2020a; ECOSOLYS, 2020b; NEOSOLAR, 2020b; SOLAR, 2020; RENOVARES, 2020)

Módulo CS6U-325P (R\$)	734,18
Inversores	
CSI-1.5K-TL (R\$) - NI °1'	2599,0
ecos-1000 (R\$) - NI °2'	1488,0
ecos-2000 (R\$) - NI °3'	2696,0
Estruturas + proteções + instalação (%)	23 % do total

Cada um dos SFCRs, compostos dos elementos da Tabela 84, foi simulado no programa SAM, tendo em consideração os pontos levantados em 3.11.2. O resultado das simulações encontra-se na Tabela 86, a qual mostra a energia a.c. entregue pelos sistemas ao longo da vida útil. A diminuição da produção de energia anual se deve principalmente à taxa de degradação do sistema.

Tabela 86: Energia a.c. entregue durante a vida útil dos SFCRs (kWh/ano)

Ano	ZB1	ZB2	ZB3	ZB4	ZB5	ZB6	ZB7	ZB8
1	2.120	2.361	1.819	2.223	2.365	2.628	3.477	2.446
2	2.109	2.349	1.810	2.212	2.353	2.615	3.459	2.434
3	2.099	2.338	1.801	2.201	2.341	2.602	3.442	2.422
4	2.088	2.326	1.792	2.190	2.330	2.589	3.425	2.410
5	2.078	2.314	1.783	2.179	2.318	2.576	3.408	2.398
6	2.067	2.303	1.774	2.168	2.306	2.563	3.391	2.386
7	2.057	2.291	1.766	2.157	2.295	2.551	3.374	2.374
8	2.047	2.280	1.757	2.146	2.283	2.538	3.357	2.362
9	2.037	2.268	1.748	2.135	2.272	2.525	3.340	2.350
10	2.026	2.257	1.739	2.125	2.261	2.512	3.323	2.338
11	2.016	2.246	1.731	2.114	2.249	2.500	3.307	2.327
12	2.006	2.234	1.722	2.104	2.238	2.487	3.290	2.315
13	1.996	2.223	1.713	2.093	2.227	2.475	3.274	2.304
14	1.986	2.212	1.705	2.083	2.216	2.463	3.257	2.292
15	1.976	2.201	1.696	2.072	2.205	2.450	3.241	2.281
16	1.966	2.190	1.688	2.062	2.194	2.438	3.225	2.269
17	1.957	2.179	1.679	2.051	2.183	2.426	3.209	2.258
18	1.947	2.168	1.671	2.041	2.172	2.414	3.193	2.246
19	1.937	2.157	1.663	2.031	2.161	2.402	3.177	2.235
20	1.927	2.147	1.654	2.021	2.150	2.390	3.161	2.224

Na Figura 41 se encontra a produção energética mensal dos sistemas durante o primeiro ano de vida. Nota-se que os SFCRs das zonas bioclimáticas 1, 2, 5, 6 e 8 possuem a mesma potência instalada e configuração, porém, devido à diferente radiação característica de cada zona, a produção energética varia consideravelmente

(ver Figura 22). A modo de exemplo, o mesmo sistema, quando instalado na zona 6, produz 20% a mais de energia do que na zona 1.

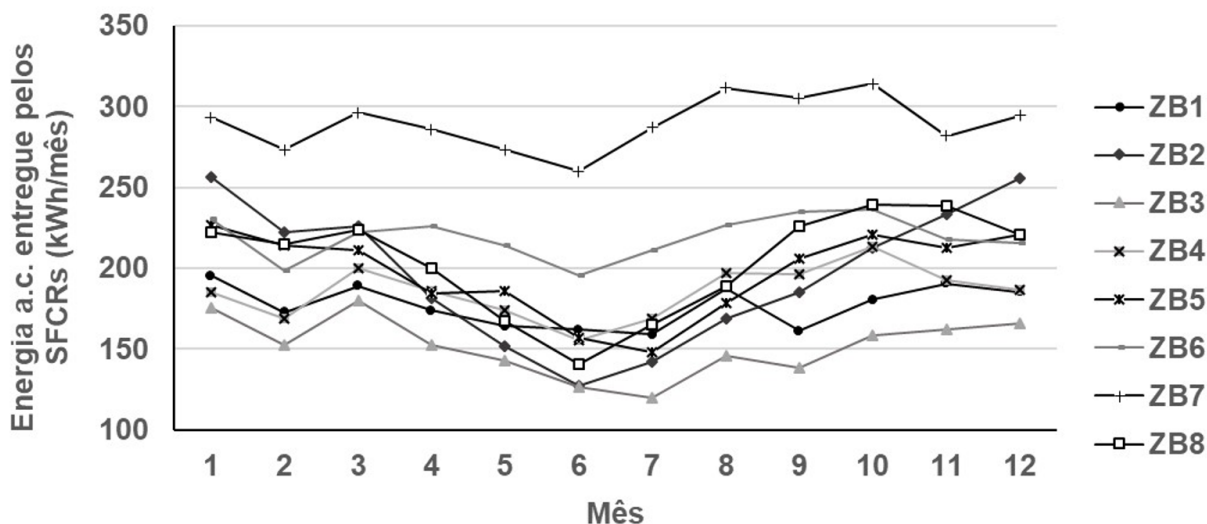


Figura 41: Energia a.c. entregue mensalmente pelos SFCRs.

A Figura 42 traz o consumo energético da edificação, com e sem considerar o custo da disponibilidade de energia, comparado com a energia a.c. entregue pelos SFCRs no primeiro ano de funcionamento e no final da vida útil. Sendo que um NZEB é uma edificação na qual existe um balanço nulo ao longo do ano entre a demanda energética e a produção através de tecnologias renováveis, e considerando a demanda como o consumo menos a disponibilidade, tem-se que os modelos de edificação das zonas 1, 2, 4, 5 e 6 são estritamente NZEBs ao longo do período de 20 anos simulado. Já as edificações das zonas 3 e 8, produzem um pouco menos de energia da demandada e, por tanto, seriam consideradas quase NZE.

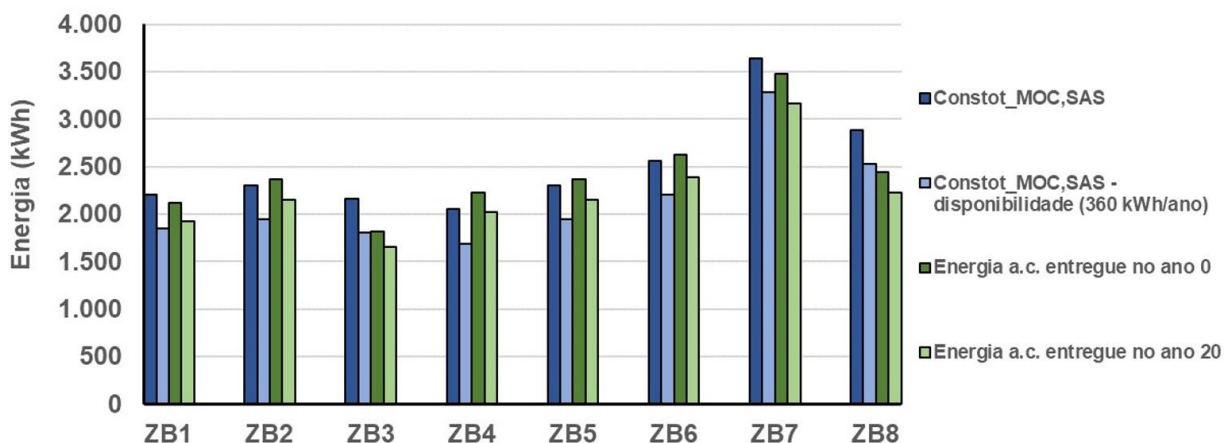


Figura 42: Consumo e produção de energia dos SFCRs

4.6. ANÁLISE FINAL DAS PROPOSTAS

4.6.1. Avaliação econômica

A Tabela 87 e Tabela 88 apresentam uma síntese, em termos econômicos e de poupança ou geração energética, das propostas de eficiência e geração de energia abordadas ao longo da presente dissertação, utilizando a tarifa de energia elétrica residencial e rural, respectivamente. Os parâmetros econômicos necessários para o cálculo do VPL foram apresentados na seção 3.7.1, Tabela 31; o horizonte de tempo adotado foi 20 anos e para cada proposta foi considerado:

- Medidas passivas de eficiência mediante OBS

Como mostra a Tabela 70, o único investimento requerido nas medidas passivas resultantes da otimização, corresponde à diferença de custo em isolamento térmico. A diferença de consumo considerada corresponde à diferença entre o consumo do MB e do MOC. O cálculo da diferença do custo de energia (dE), segue o procedimento apresentado na seção 3.7.1, item 3, através do qual, o valor de UPV* deu por resultado 14,69 para a tarifa residencial e 16,01 para a tarifa rural.

- Geração de AQS pelo SAS

O investimento e VPL do SAS tinha sido previamente calculado como índice para toma de decisão no dimensionamento, seção 3.10.2 e os valores resultantes encontram-se na Tabela 79.

- Geração de energia elétrica pelos SFs

O investimento no SFI e SFCR encontram-se na Tabela 82 e Tabela 84, respectivamente. Por causa do sistema de compensação de energia brasileiro, para o SFCR, a energia computada (Ecomp) pode: (i) se a energia a.c. entregue pelo SF é menor que a demanda (MOC_{SAS}) menos o custo de disponibilidade, ser então, igual à energia entregue pelo SF; (ii) se a energia a.c. entregue pelo SF é maior que a demanda menos o custo de disponibilidade, ser então, igual à demanda menos o custo de disponibilidade. No caso do SFI, para o qual o sistema de compensação não aplica, a energia poupada considerada no cálculo do VPL é a correspondente à demanda do MOC_{SAS} .

Tabela 87: Análise financeira do total de propostas de eficiência - Tarifa residencial

	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8
VPL do processo de otimização								
I (R\$)	550	631	-1.101	-1.195	-1.139	-1.195	-1.195	-1.195
Constot _b (kWh)	2.525	2.907	2.884	3.033	3.157	3.937	5.386	4.623
Constot _{MOC} (kWh)	2.193	2.405	2.220	2.193	2.361	2.708	3.769	3.028
Constot (MB - MOC) (kWh/ano)	332	502	664	840	796	1.229	1.617	1.595
dE (R\$)	3.897	5.892	7.794	9.860	9.343	14.426	18.980	18.722
dLCC (R\$)	3.347	5.261	8.895	11.055	10.482	15.621	20.175	19.917
VPL do SAS								
I (R\$)	-3.361	-3.361	-3.052	-2.571	-2.571	-2.571	-2.417	-2.571
Qsalva (kWh)	2.519	2.504	2.097	2.049	1.941	1.728	1.337	1.548
VPL (R\$)	26.221	26.043	21.574	21.486	20.217	17.721	13.287	15.607
VPL do SFCR								
I (R\$)	8.143	8.143	5.746	5.746	8.143	8.143	10.176	8.143
Ecomp ano 1	1.850	1.946	1.805	1.689	1.940	2.200	3.279	2.446
Ecomp ano 20	1.850	1.946	1.654	1.689	1.940	2.200	3.161	2.224
VPL (R\$)	13.577	13.411	14.240	12.953	13.344	16.223	26.134	18.947
VPL do SFI								
I (R\$)	179.251	220.913	175.437	117.897	215.192	150.548	220.913	215.192
Constot _{MOC,SAS} (kWh)	2.210	2.306	2.165	2.049	2.300	2.560	3.639	2.886
VPL (R\$)	-153.305	-193.831	-150.017	-93.842	-188.181	-120.484	-178.184	-181.302
VPL TOTAL								
VPL (MOC, SAS, SFCR)	43.145	44.715	44.709	45.494	44.043	49.566	59.597	54.471
VPL (MOC, SAS, SFI)	-123.737	-162.526	-119.548	-61.301	-157.482	-87.141	-144.721	-145.778

Tabela 88: Análise financeira do total de propostas de eficiência - Tarifa rural

	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8
VPL do processo de otimização								
I (R\$)	550	631	-1.101	-1.195	-1.139	-1.195	-1.195	-1.195
Constot (MB - MOC) (kWh/ano)	332	502	664	840	796	1.229	1.617	1.595
dE (R\$)	3.226	4.878	6.452	8.162	7.734	11.941	15.711	15.498
dLCC (R\$)	3.776	5.509	5.351	6.967	6.595	10.746	14.516	14.303
VPL do SAS								
I (R\$)	-3.361	-3.361	-3.052	-2.571	-2.571	-2.571	-2.417	-2.571
Qsalva (kWh)	2.519	2.504	2.097	2.049	1.941	1.728	1.337	1.548
VPL (R\$)	21.126	20.979	17.332	17.343	16.292	14.226	10.582	12.476
VPL do SFCR								
I (R\$)	8.143	8.143	5.746	5.746	8.143	8.143	10.176	8.143
Ecomp ano 1	1.850	1.946	1.805	1.689	1.940	2.200	3.279	2.446
Ecomp ano 20	1.850	1.946	1.654	1.689	1.940	2.200	3.161	2.224
VPL (R\$)	9.836	9.541	10.651	9.595	9.486	11.848	19.615	14.083
VPL do SFI								
I (R\$)	157.774	198.495	154.396	97.986	192.833	125.662	185.543	187.139
Constot _{MOC,SAS} (kWh)	2.210	2.306	2.165	2.049	2.300	2.560	3.639	2.886
VPL (R\$)	-153.305	-193.831	-150.017	-93.842	-188.181	-120.484	-178.184	-181.302
VPL TOTAL								
VPL (MOC, SAS, SFCR)	34.738	36.028	33.335	33.904	32.373	36.821	44.714	40.862
VPL (MOC, SAS, SFI)	-128.403	-167.343	-127.334	-69.533	-165.294	-95.511	-153.085	-154.523

A Figura 43 exibe o contraste do VPL das propostas, quando adotados os SFCRs e SFIs, para a tarifa residencial (cores escuras) e rural (cores claras). Evidentemente, o uso de SFIs não acarreta retorno econômico para nenhuma das zonas bioclimáticas avaliadas e deve ser aplicado somente em casos em que a rede elétrica não é uma opção disponível. Fazendo uma média entre o resultado de todas as ZBs, 24% do retorno econômico provém das medidas passivas, 43% do SAS e 33% dos SFCR. Para o caso de necessidade de aplicação de SFIs, novamente fazendo uma média entre o resultado de todas as ZBs, a aplicação das medidas de eficiência energética passivas e de aquecimento solar de água, fazem com que o VPL total seja diminuído 18%. A partir da Figura 43, observa-se também, que a participação das medidas passivas resultantes da OBS no retorno econômico total, cresce conforme aumenta a ZB, sendo que para a ZB1 corresponde a 8%, e para a ZB8 representa 24%. Verifica-se também, por causa da diferença entre as tarifas residencial e rural, que o retorno econômico gerado pelos modelos de edificação propostos, é de 20 a 25% maior para aplicações em ambientes urbanos.

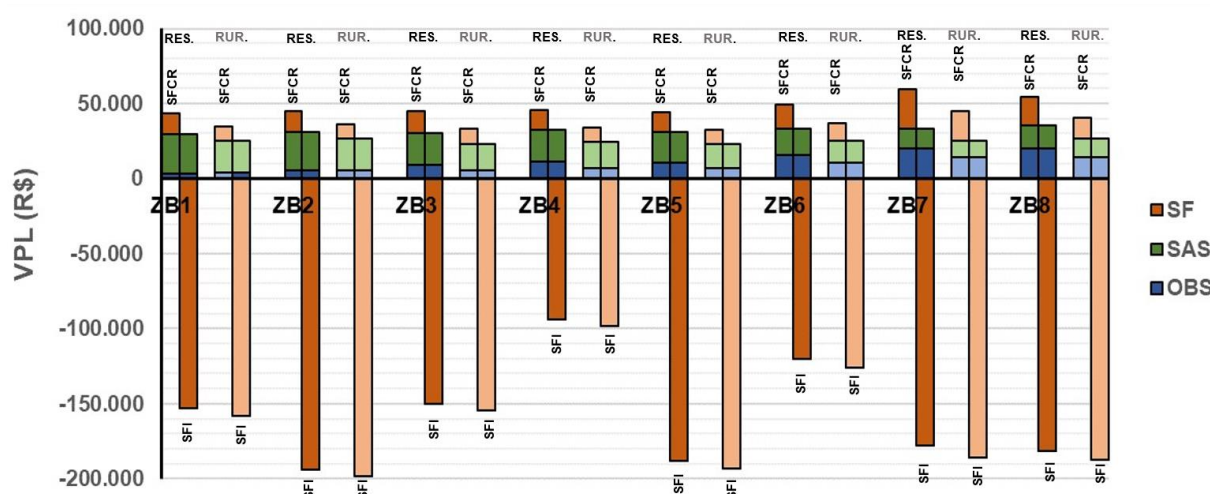


Figura 43: Comparação do VPL das alternativas com SFCR e SFI, para a tarifa residencial e rural.

4.6.2. Comparação com índices de NZEB

Em todo o mundo, existem numerosas normativas sobre edificações de baixa energia e/ou NZE; cada uma utilizando uma definição diferente. Na UE, com a entrada em vigor da *Energy Performance of Building Directive* (EPBD), os estados membros foram obrigados a elaborar planos nacionais para aumentar o número de NZEBs e a

estabelecer definições e indicadores de desempenho mínimo que refletem condições regionais ou locais por país (D'AGOSTINO et al., 2016). Os países de América Latina, incluído o Brasil, ainda não possuem normas relativas a NZEBs; portanto, decidiu-se comprar os modelos de edificação desenvolvidos neste trabalho, com os índices mínimos de desempenho energético de diversos países pertencentes à UE (WILLIAMS et al., 2016).

De acordo com o EPBD, um NZEB é aquele que tem um desempenho energético muito alto, com um mínimo requerimento de energia produzido em sua maioria a partir de fontes renováveis, no local ou perto. Reconhecendo as diferentes condições climáticas, o EPBD não fornece um índice de desempenho mínimo ou máximo ($\text{kWh/m}^2\cdot\text{ano}$) que governe os requerimentos de todas as construções da UE. Pelo contrário, exige que os estados membros definam “o desempenho energético muito alto” e “a maioria de energia produzida a partir de fontes renováveis”, de acordo com suas características locais (D'AGOSTINO et al., 2016). Na Tabela 89 encontram-se os indicadores de desempenho energético de edificações residenciais expressos como energia primária ($\text{kWh/m}^2\cdot\text{ano}$), definidos por alguns dos países membros da UE. A tabela coleta informações baseadas em métodos de cálculo não homogêneos e, portanto, a energia primária pode variar.

Tabela 89: Indicadores de desempenho energético expressos como energia primária (kWh/m². ano) definidos por países membros da EU
Fonte: D'Agostino et al. (2016)

	Prédios residenciais novos (kWh/m ² .ano)	Notas
AT - Austria	160	-
BG - Bulgária	~30-50	A definição definitiva ainda não foi aprovada.
CY - Chipre	100	Uso de energia incluído: Aquecimento, refrigeração, AQS, iluminação, ventilação, sistemas auxiliares.
DK - Dinamarca	20	Uso de energia incluído: Aquecimento, refrigeração, AQS, ventilação, iluminação.
EE - Estônia	50	Uso de energia incluído: Aquecimento, refrigeração, ventilação, AQS, iluminação, aparelhos auxiliares de HVAC.
FR - França	40-65	Uso de energia incluído: Aquecimento, refrigeração, ventilação, AQS, iluminação, sistemas auxiliares. Depende do tipo de edificação e clima.
HR - Croácia	33-41	
HU - Hungria	50-72	Requisitos propostos dependem de uma edificação de referência.
IE - Irlanda	45	Uso de energia incluído: Aquecimento, ventilação, AQS, iluminação.
LV - Letônia	95	Uso de energia incluído: Aquecimento, refrigeração, ventilação, AQS, iluminação. Energia demanda por aquecimento < 30 kWh/m ² . ano.
MT - Malta	55 (<i>semi-detached e detached houses</i>), 75 (<i>terraced houses</i>) 115 (<i>flatted dwellings</i>)	Uso de energia incluído: Aquecimento, refrigeração, AQS, ventilação, iluminação.
PL - Polônia	60-75	Depende do tipo de edificação.
RO - Romênia	93-117	Depende do tipo de edificação e clima.
SE - Suécia	30-75	Depende do tipo de edificação e clima.
SI - Eslovênia	75 (unifamiliar), 80 (multifamiliar)	Por unidade de superfície condicionada, dependendo do edifício de referência.
SK - Eslováquia	54 (unifamiliar)	Uso de energia incluído: Aquecimento, AQS.
UK - Reino Unido	~44	Necessidade de cumprir com emissões zero de carbono sob discussão.

Na Tabela 89, a maior parte dos índices define a energia primária como sendo a soma das necessidades energéticas para: aquecimento, refrigeração, AQS e consumo auxiliar (bombas e ventiladores). A partir dessa definição, foi calculada a energia primária para os modelos de edificação desenvolvidos no presente trabalho e o respectivo indicador de desempenho; os resultados do cálculo são apresentados na Tabela 90.

Tabela 90: Indicadores de desempenho calculados para os modelos de edificação propostos

	ZB1	ZB2	ZB3	ZB4	ZB5	ZB6	ZB7	ZB8
Aquec. (kWh)	543	557	223	80	96	35	12	0
AQS (kWh)	192	77	120	31	115	28	45	33
Ilum. (kWh)	332	333	332	330	332	333	332	334
Modelo otimizado com conforto (MOC)								
Refr. (kWh)	172	345	516	638	768	1.132	2.089	1.449
Vent. (kWh)	97	122	100	98	117	159	286	197
Energia primária (kWh)	1.337	1.434	1.292	1.176	1.428	1.687	2.763	2.012
Indicador (kWh/m².ano)	23,9	25,6	23,1	21,0	25,5	30,2	49,4	36,0
Modelo otimizado (MO)								
Refr. (kWh)	221	470	796	908	1.117	1.697	2.984	2.303
Vent. (kWh)	107	141	140	136	163	241	415	319
Energia primária (kWh)	1.395	1.578	1.611	1.485	1.823	2.334	3.788	2.989
Indicador (kWh/m².ano)	25,0	28,2	28,8	26,6	32,6	41,7	67,7	53,5

Área da planta dos modelos = 55,91m². AQS = Q_auxiliar do SAS.

A Figura 44 mostra a comparação entre os indicadores de desempenho energético definidos por países membros da UE, com o resultado do cálculo dos mesmos indicadores para os modelos de edificação desenvolvidos nesta dissertação.

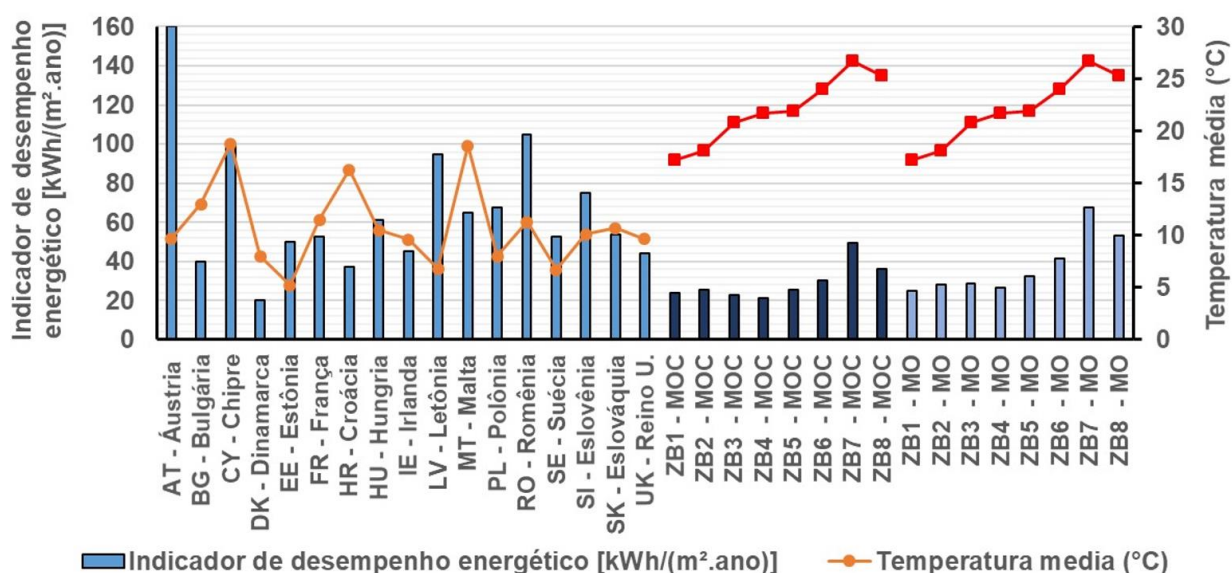


Figura 44: Comparação dos indicadores de desempenho energético e temperatura média de países da UE com os modelos desenvolvidos.

Fonte dos dados de temperatura: Climatedata (2020).

Os valores-alvo da energia primária dos países da UE, variam dos mais ambiciosos de 20 kWh/m².ano (Dinamarca) a 160 kWh/m².ano (Áustria); sendo que a média corresponde a 66 kWh/m².ano. A partir da figura, observa-se que os índices calculados, tanto para o MO como para o MOC, encontram-se dentro da definição de desempenho mínimo da maioria dos países membros da UE. A média dos indicadores do MO, para todas as ZBs, deu por resultado 38 kWh/m².ano, e para o MOC, 30 kWh/m².ano; ambas bem inferiores à média de desempenho mínimo igual a 66 kWh/m².ano. Nota-se também, que as ZB7 e ZB8 deram por resultado os maiores valores para os índices, devido à temperatura média maior e respectiva maior demanda em refrigeração. Essa diferença faz explícita a importância da definição do “desempenho energético muito alto” para NZEBs de acordo com os as características locais. Apesar dos resultados obtidos estarem dentro das definições dos países da UE, a comparação é inconsistente, devido à grande diferença climática; como mostra a figura, a temperatura média dos países da UE é 11 °C, enquanto no Brasil é 22°C. Isto sugere a necessidade de uma definição universal de NZEBs por clima, ou pelo menos, uma própria de América Latina e/ou Brasil.

5. CONCLUSÕES

O objetivo principal da presente dissertação foi desenvolver um modelo de edificação residencial em contêineres marítimos do tipo energia zero, para cada zona bioclimática do território brasileiro. Mediante o processo de otimização baseada em simulação (OBS) utilizando os programas EnergyPlus e GenOpt, foram minimizadas as funções objetivo diferença do custo do ciclo de vida (dLCC) e consumo (Cons), separadamente. Aplicando o algoritmo híbrido, da minimização da função dLCC obteve-se por resultado valores que variam entre os R\$ -5.000 e os R\$ -13.500. Com relação ao consumo energético anual, foram obtidas reduções entre 11 e 18% para a energia total, e de 14 e 27% para ar condicionado e iluminação. Através da minimização direta da função Cons, foram obtidos resultados similares, variando entre 12 e 19%, para o consumo total.

O processo de otimização fez com que as horas de desconforto entre o modelo base (MB) e o modelo otimizado (MO), diminuíssem em média 11% e 23%, pelo método de Fanger e adaptativo, respectivamente. O cálculo do consumo energético do MO quando o termostato do ar condicionado funciona de acordo com modelo de conforto adaptativo, em lugar de utilizar a programação habitual definida na NBR 16401-2, evidenciou a importância da definição dos parâmetros de conforto térmico para edifícios construídos em climas quentes. Essa importância verificou-se através dos resultados obtidos para as zonas bioclimáticas mais quentes, 4, 5, 6, 7, e 8, onde, o consumo em condicionamento de ar entre o MO e o modelo otimizado com conforto (MOC) foi diminuído de 30 a 37%.

O dimensionamento dos sistemas de aquecimento de água solar (SASs) mediante simulação no programa SAM, obteve resultados para a área coletora que variam de 1m² a 4m², dependendo da zona bioclimática. Através das simulações no SAM, constatou-se que o dimensionamento da área coletora pela norma NBR 15569, em ocasiões, podem levar ao superdimensionamento. O dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos isolados (SFIs) deu por resultado potências fotovoltaicas que variam de 2,93 a 5,85 kWp e necessidade de bancos de 30 a 60 baterias de 220Ah. O dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCRs) deu por resultado que para cobrir a demanda de energia, são necessários SFs que variam de 1,30 a 2,28kWp. A simulação da produção de energia dos SFCRs dimensionados,

permitiu verificar que os mesmos conseguem suprir total ou quase totalmente a demanda energética anual dos modelos de edificação propostos, atingindo assim a meta energia zero.

A partir da análise econômica, verificou-se que o uso de SFIs não proporciona um retorno econômico positivo, portanto, SFI devem ser aplicados somente em casos em que a rede elétrica não é uma opção disponível. Em contrapartida, o uso de SFCRs verificou-se rentável, com VPLs que variam entre aproximadamente os R\$13.000 e R\$26.000. A avaliação conjunta do total de propostas de eficiência: OBS, SAS e SFCR, para um horizonte de 20 anos, deu por resultado VPLs que variam entre os R\$43.000 e R\$60.000. Em média, esse retorno econômico é composto 24% pelas medidas passivas, 43% pelo SAS e 33% pelo SFCR. Devido à diferença no valor das tarifas residencial e rural, verificou-se também, que o retorno econômico dos modelos de edificação é de 20 a 26% maior para aplicações em ambientes urbanos.

A comparação entre os índices para definir edificação energia zero estabelecidos por países da União Europeia (UE) com os valores calculados para os modelos de edificação propostos, mostraram que a energia primaria dos modelos propostos se encontra dentro dos valores estabelecidos na Europa. No entanto, apesar dos resultados obtidos estarem dentro das definições dos países da UE, a grande diferença climática entre a Europa e o Brasil não deveria ser ignorada, isto sugere a necessidade de uma definição universal de NZEBs por clima, ou pelo menos, uma própria de América Latina e/ou Brasil.

Com base na pesquisa bibliográfica realizada, este trabalho é o primeiro em otimizar matematicamente um modelo de simulação dinâmica de uma edificação baseada em contêineres marítimos (EBCM). A dissertação mostrou de forma comparativa a aplicação de diversas medidas de eficiência energética, passivas e ativas, em climas quentes. Proporcionando uma ampla gama de resultados que podem servir como base comparativa para trabalhos sobre NZEBs residenciais de baixo custo em climas quentes. Adicionalmente, pode auxiliar no estabelecimento de índices de desempenho mínimos para NZEBs aplicados em climas temperados e quentes, os quais, para o caso do Brasil, verificaram-se inexistentes. Além disso, o trabalho identifica e ajuda a promover práticas eficientes para a construção em contêineres, incentivando a inclusão de este tipo de edifício sustentável como alternativa à construção convencional.

Para validar os resultados e dar continuidade à pesquisa, sugere-se a construção de um protótipo de edificação em contêineres energia zero, com sistema de gerenciamento para controle pelo lado da demanda. Dessa maneira, a variação de diversos parâmetros construtivos e de hábitos de uso, poderão ser mensurados e analisado o seu impacto no consumo real. Com relação à otimização, sugere-se repetir o estudo aplicando otimização do tipo multiobjetivo. Também, realizar uma análise de sensibilidade das variáveis analisadas assim como de outras, para determinar o peso que exerce cada uma delas na minimização do consumo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

3M. *Window Film Manual*. St. Paul, Minnesota: 3M Renewable Energy Division, 2012. ABECIP, (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS ENTIDADES DE CRÉDITO IMOBILIÁRIO E POUPANÇA). *Caderneta de Poupança - Índices Mensais*. Disponível em: <<https://bit.ly/2NX3aqr>>. Acesso em: 10 jul. 2019.

ABNT, A. B. DE N. T. *NBR 15220-2 Desempenho térmico de edificações — Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, RJ: ABNT. , 2003

ABNT, A. B. DE N. T. *NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações - Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social*. Rio de Janeiro, RJ: ABNT. , 2005

ABNT, A. B. DE N. T. *NBR 15569 Sistema de aquecimento solar de água em circuito direto - Projeto e instalação*. Rio de Janeiro, RJ: ABNT., 2008a

ABNT, A. B. DE N. T. *NBR 15575-1 2013 Edificações Habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, RJ: ABNT. , 2013a

ABNT, A. B. DE N. T. *NBR 15575-4 2013 Edificações Habitacionais — Desempenho Parte 4: Sistemas de vedações verticais internas e externas*. . Rio de Janeiro, RJ: ABNT. , 2013b

ABNT, A. B. DE N. T. *NBR 15575-5 2013 Edificações Habitacionais — Desempenho Parte 5: Requisitos para os sistemas de coberturas*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, RJ: ABNT. , 2013c

ABNT, A. B. DE N. T. *NBR 16401-1: Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários - Parte 1: Projetos das instalações*. Rio de Janeiro, RJ: ABNT. , 2008b

ABNT, A. B. DE N. T. *NBR 5413: Iluminância de interiores*. Rio de Janeiro, RJ: ABNT. , 1992

ABRAIN (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE INCORPORADORAS IMOBILIÁRIAS). *Análise das Necessidades Habitacionais e suas Tendências para os Próximos Dez Anos*. . [S.l: s.n.], 2018.

ABRASHEVA, G.; SENK, D.; HÄUSSLING, R. Shipping containers for a sustainable habitat perspective. *Revue de Métallurgie*, v. 109, p. 381–389, 2012.

ALIREZAEI, M.; NOORI, M.; TATARI, O. Getting to net zero energy building: Investigating the role of vehicle to home technology. *Energy and Buildings*, v. 130, p. 465–476, 2016.

AMORIM, L. *et al.* Reutilização de containers marítimos na construção de residências: benefícios no consumo dos recursos e geração de resíduos sólidos. 2018, Gramado, RS: IBEAS (Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais), 2018. p. 1–7.

ANEEL (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA). *Atlas de Energia Elétrica do Brasil*. 3. ed. Brasília: ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), 2008.

ANTAC, A. N. DE T. A. *Movimentação de Contêineres*. Disponível em: <<http://web.antaq.gov.br/ANUARIO/>>. Acesso em: 15 abr. 2019.

ASHRAE, A. S. OF H. R. AND A. E. Fenestration. *ASHRAE Handbook: Fundamentals SI Edition*. Atlanta, GA, USA: ASHRAE, 2013a.

ASHRAE, A. S. OF H. R. AND A. E. Heat, air, and moisture control in building assemblies - Material properties. *ASHRAE Handbook: Fundamentals SI Edition*. Atlanta, GA, USA: ASHRAE, 2013b.

ATHIENITIS, A.; O'BRIEN, W. *Modeling, Design, and Optimization of Net-Zero Energy Buildings*. Berlin, Germany: Wilhelm Ernst & Sohn, 2015.

ATMACA, A.; ATMACA, N. Comparative life cycle energy and cost analysis of post-disaster temporary housings. *Applied Energy*, v. 171, p. 429–443, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.058>>.

BCB (BANCO CENTRAL DO BRASIL). *Taxas de juros básicas – Histórico*. Disponível em: <<https://bit.ly/2FbGICg>>. Acesso em: 10 jul. 2019.

BERBESZ, A. M.; SZEFER, I. M. Innovations in shaping the residential and retail buildings . Functional and pro-environmental potential of shipping containers in architecture. 2018, [S.l: s.n.], 2018.

BERNARDO, L. F. A. *et al.* Use of Refurbished Shipping Containers for the Construction of Housing Buildings: Details for the Structural Project. *Journal of Civil Engineering and Management*, v. 19, n. 5, p. 628–646, 2013.

BOWLEY, W.; MUKHOPADHYAYA, P. A SUSTAINABLE DESIGN FOR AN OFF-GRID PASSIVE CONTAINER HOUSE. *International Review of Applied Sciences and Engineering*, v. 8, n. 2, p. 145–152, 2017.

BRADERCO. *Projeções Braderco Longo Prazo*. Disponível em: <<https://bit.ly/2Ggc73>>. Acesso em: 11 jul. 2019.

CAO, X.; DAI, X.; LIU, J. Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade. *Energy and Buildings*, v. 128, p. 198–213, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.089>>.

CARBONARI, L. T.; BARTH, F. Reutilização de contêineres padrão ISO na construção de edifícios comerciais no sul do Brasil. *PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção*, v. 6, n. 4, p. 255–265, 2015. Disponível em: < <https://bit.ly/2J92I36>>.

CARRIER. *Manual de Instalação, Operação e Manutenção - Hi Wall Carrier*. . Manaus, AM: Carrier. , 2015

CASSEN, R. H. *Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development*. . [S.l: s.n.], 1987.

CBIE (CENTRO BRASILEIRO DE INFRAESTRUTURA). *How many ports have in Brazil?* Disponível em: <<https://bit.ly/2Lr6iZ3>>. Acesso em: 26 jun. 2019.

CEPEL, C. DE P. DE E. E.; CRESESB, C. DE R. PARA E. S. E E. S. B. **MANUAL DE ENGENHARIA PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**. Rio de Janeiro, RJ: CEPEL - CRESESB, 2014.

CHOW, J. C.; REN, C.; MATHIAS, B. InterBoxes: A social innovation in education in rural China. *Children and Youth Services Review*, v. 101, n. June 2019, p. 217–224, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.childyouth.2019.04.008>>.

CIBSE (THE CHARTERED INSTITUTION OF BUILDING SERVICES ENGINEERS). *Energy Efficiency in Buildings - CIBSE Guide F*. 3. ed. London, UK: CIBSE, 2012.

CLIMATEDATA. Temperature - Precipitation - Sunshine. Disponível em: <<https://www.climatedata.eu/>>. Acesso em: 11/2/2020.

COOPERSOL. Aquecedores Solares - Boiler Baixa Pressão. Disponível em: <<http://bit.ly/2uk0N82>>. Acesso em: 2/3/2020a.

COOPERSOL. Aquecedores Solares - Placas. Disponível em: <<http://bit.ly/2OrDWOR>>. Acesso em: 3/2/2020b.

COPEL (COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA). *Tarifas por Classe*. Disponível em: <<https://bit.ly/2NV5r5B>>. Acesso em: 16 jul. 2019a.

COPEL (COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA). *Meu Simulador de Consumo*. Disponível em: <<https://bit.ly/2E22buV>>. Acesso em: 15 maio 2019b.

COSTA, V. A. C. DA; SOUZA, H. A. DE. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE HABITAÇÃO UTILIZANDO CONTAINERS. 2015, São Paulo: [s.n.], 2015. p. 1–9. CRAWLEY, B. D.; PLESS, S.; TORCELLINI, P. Getting to Net Zero. *ASHRAE Journal*, n. September, 2009.

CRESESB, C. DE R. PARA E. S. E E. S. B. Potencial Solar - SunData v 3.0. Disponível em: <<http://bit.ly/2Uljldj>>. Acesso em: 25/12/2019.

CRUZ, T. B. *Análise do potencial de inserção de energia solar térmica para aquecimento de água em residências unifamiliares no Brasil*. 2016. 173 f. Universidade Federal de Rio de Janeiro, 2016.

CYPE, (INGENIEROS S.A.). *Gerador de preços para construção civil*. Disponível em: <<https://bit.ly/2xR8C3w>>. Acesso em: 30 maio 2019.

D'AGOSTINO, D.; ZANGHERI, P.; CUNIBERTI, B.; PACI, D.; BERTOLDI, P. **Synthesis Report on the National Plans for Nearly Zero Energy Buildings (NZEBS)**. European Union: European Commission, 2016.

DANTAS, S.; POMPERMAYER, F. Viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos no Brasil e possíveis efeitos no setor elétrico. 2018. Rio de Janeiro, RJ: IPEA (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada).

DOE. *Input Output Reference EnergyPlus*. Washington, D.C.: EnergyPlus, U.S. Department of Energy's (DOE), 2016.

DOE (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY); BTO (BUILDING TECHNOLOGIES OFFICE); NREL (NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY). *Weather Data*. Disponível em: <<https://energyplus.net/weather>>. Acesso em: 20 mar. 2019.

DOE (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY). *Engineering Reference - EnergyPlus*. 9.0.1 ed. Illinois, USA: DOE, 2018.

DUMAS, A. *et al.* Zero Emission Temporary Habitation: A Passive Container House Acclimatized by Geothermal Water. *Journal of Solar Energy Engineering*, v. 0, n. November, 2014.

ECOSOLYS. Inversor Solar Ecosolys Ecos-1000. Disponível em: <<http://bit.ly/378UTnl>>. Acesso em: 7/2/2020a.

ECOSOLYS. Inversor Solar Ecosolys Ecos-2000. Disponível em: <<http://bit.ly/3bnYFgz>>. Acesso em: 7/2/2020b.

ELETROBRAS; PROCEL. *Tabela de estimativa de consumo médio mensal de eletrodomésticos de acordo com um uso hipotético*. Disponível em: <<https://bit.ly/2M1xsmu>>. Acesso em: 6 dez. 2019.

ELETROBRAS; PROCEL. *Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso. Procel*. [S.l: s.n.], 2005. Disponível em: <<https://bit.ly/1x5ApXG>>.

ELRAYIES, G. M. Thermal Performance Assessment of Shipping Container Architecture in Hot and Humid Climates. *International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology*, v. 7, n. 4, 2017.

EPE (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA). *Anuário Estatístico de Energia Elétrica*. Disponível em: <<https://bit.ly/2LSmVgg>>. Acesso em: 3 maio 2019.

EPE (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA). *Matriz Energética Nacional 2019 - Ano Base 2018*. Rio de Janeiro, RJ: EPE, Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em: <<https://bit.ly/2GjIE5>>. , 2019

EPE (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA); MME (MINISTERIO DE MINAS E ENERIGA). *Plano Decenal de Expansão de Energia 2026*. Rio de Janeiro, RJ: [s.n.], 2017.

EPE (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA); MME (MINISTERIO DE MINAS E ENERGIA). *Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética*. . Brasília: [s.n.], 2018.

EU (EUROPEAN UNION). *DIRECTIVE 2010/31/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 19 May 2010 on the energy performance of buildings*. . [S.I.]: Official Journal of the European Union, 2010.

FULLER, S. K.; PETERSEN, S. R. *Life Cycle Costing Manual for the Federal Energy Management Program*. 1996. ed. Washington, D.C.: NIST (National Institute of Standards and Technology), 1996.

GIRIUNAS, K.; SEZEN, H.; DUPAIX, R. B. Evaluation , modeling , and analysis of shipping container building structures. *Engineering Structures*, v. 43, p. 48–57, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.05.001>>.

GRANT, E. “Pack 'em, rack 'em and stack 'em”: The Appropriateness of the Use and Reuse of Shipping Containers for Prison Accommodation. *Australian Journal of Construction Economics and Building (AJCEB)*, v. 13, n. 3, p. 35–44, 2012.

GUEDES, R.; BUORO, A. B. Reuso de containers marítimos na construção civil Reuse of shipping containers in construction. *Revista de Iniciação Científica, Tecnológica e Artística*, v. 5, n. 3, 2015.

HARKOUSS, F.; FARDOUN, F.; HENRY, P. Passive design optimization of low energy buildings in different climates Air Changer per Hour. *Energy*, v. 165, p. 591–613, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.019>>.

IBGE, I. B. DE G. E E. *Censo Demográfico 2010*. IBGE. Rio de Janeiro, RJ: [s.n.], 2010.

IEA, I. E. A. *Transition to Sustainable Buildings. Strategies and Opportunities to 2050*. Paris: IEA, 2013. Disponível em: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Building2013_free.pdf>

IEA, I. E. A. *World Energy Outlook 2018*. [S.I.]: IEA, International Energy Agency, 2018.

INMETRO (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA QUALIDADE E TECNOLOGIA). *Condicionadores de ar split hi-wall*. Disponível em: <<https://bit.ly/2SefLUQ>>. Acesso em: 13 maio 2019a.

INMETRO (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA QUALIDADE E TECNOLOGIA). Tabelas de consumo/eficiência energética. Disponível em: <<http://bit.ly/2UsTS78>>. Acesso em: 25/12/2019b.

IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE). *Climate Change 2014: Synthesis Report*. . Geneva, Switzerland: [s.n.], 2015.

IPEEC, I. P. FOR E. E. C. *Zero Energy Building Definitions and Policy Activity. An International Review*. . Colorado, USA: [s.n.], 2018.

ISLAM, H. *et al.* Life cycle assessment of shipping container home: A sustainable construction. *Energy & Buildings*, v. 128, p. 673–685, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.002>>.

ISMAIL, M. *et al.* Container architecture in the hot-humid tropics: potential and constraints. 2015, Malaysia: [s.n.], 2015.

ISORECORT. *Lajotas ou blocos de EPS para lajes*. Disponível em: <<https://bit.ly/2Lk58PB>>. Acesso em: 14 jul. 2019.

INMET, I. N. DE M. BDMEP - Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa. Disponível em: <<http://bit.ly/39b1CPp>>. Acesso em: 6/2/2020.

KAVEH, P.; MAHDAVI, A. A performance comparison of ordinary and container classrooms in Austria. *Asian Journal of Civil Engineering (BHRC)*, v. 15, n. 3, p. 383–390, 2014.

KHEIRI, F. A review on optimization methods applied in energy-efficient building geometry and envelope design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 92, n. March, p. 897–920, 2018. Disponível em:

KIBERT, C. J. *SUSTAINABLE CONSTRUCTION Green Building Design and Delivery*. 4. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2016.

KIM, D. *PRELIMINARY LIFE CYCLE ANALYSIS OF MODULAR AND CONVENTIONAL HOUSING IN BENTON HARBOR, MICHIGAN*. 2008. 58 f. University of Michigan, 2008.

KING, E. *et al.* Feasibility of Using ISO Shipping Container to Build Low Cost House in Malaysia. *International Journal of Engineering & Technology (IJET)*, v. 7, p. 933–939, 2018.

KOTEY, N.; WRIGHT, J. L.; COLLINS, M. Determining off-normal solar optical properties of drapery fabrics. *ASHRAE Transactions*, v. 115 PART 2, p. 3–17, 2009.

KREBS, L. F.; MOURA, P. W.; CUNHA, E. G. DA. Habitação em container: um estudo paramétrico para a zona bioclimática 3. *Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental*, p. 90–101, 16 dez. 2015. Disponível em: <http://www.portaldeperiodicos.unisul.br/index.php/gestao_ambiental/article/view/3347/2380>. Acesso em: 9 jun. 2018.

KRISTIANSEN, A. B.; MA, T.; WANG, R. Z. Perspectives on industrialized transportable solar powered zero energy buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 108, n. February, p. 112–124, 2019.

LABEEE, L. DE E. E. EM E. *Analysis SOL-AR*. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/downloads/softwares/analysis-sol-ar>>. Acesso em: 4 abr. 2019.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L. *Eficiência Energética na Arquitetura*. 3. ed. Rio de Janeiro, RJ: Eletrobras, Procel, MME, 2014.

LAWRENCE LAB, L. B. N. L. *WINDOW Software Downloads*. Disponível em: <<https://windows.lbl.gov/tools/window/software-download>>. Acesso em: 5 mar. 2017.

MMA, (MINISTÉRIO DE MEIO AMBIENTE). *INÉRCIA TÉRMICA PARA AQUECIMENTO*. Disponível em: <<https://bit.ly/2XKV34c>>. Acesso em: 4 jul. 2019a.

MMA, (MINISTÉRIO DE MEIO AMBIENTE). *TIPOS DE PROTEÇÃO SOLAR*. Disponível em: <<https://bit.ly/2tN3nmj>>. Acesso em: 5 jul. 2019b.

MME, M. DE M. E E. *Plano Nacional de Energia 2050 Cenário sócio-econômico e demanda de energia*. . Rio de Janeiro, RJ: [s.n.], 2015.

MOLINAROLI, A. *China's clean, green buildings of the future*. Disponível em: <<https://bit.ly/2tX4K1>>. Acesso em: 26 jun. 2019.

MOURA. Manual Técnico Moura Clean 12MF220. Disponível em: <<http://bit.ly/2v2QXYI>>. Acesso em: 5/1/2020.

NDUKA, D. *et al.* The use of intermodal steel building unit (ISBU) for the provision of habitable homes: Enablers and challenges. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*, v. 9, n. 13, p. 340–352, 2018.

NEJAT, P. *et al.* A global review of energy consumption , CO 2 emissions and policy in the residential sector (with an overview of the top ten CO 2 emitting countries). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 43, p. 843–862, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.066>>.

NEOSOLAR. Controlador de carga solar. Disponível em: <<http://bit.ly/2UrclB4>>. Acesso em: 5/2/2020a.

NEOSOLAR. Energia Solar Fotovoltaica - Neosolar. Disponível em: <<https://www.neosolar.com.br/>>. Acesso em: 18/2/2020b.

NGUYEN, A.; REITER, S.; RIGO, P. A. A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. *Applied Energy*, v. 113, p. 1043–1058, 2014.

NREL, N. R. E. L. System Advisor Model (SAM). Disponível em: <<https://sam.nrel.gov/>>. Acesso em: 2/3/2019.

OCCHI, T.; ROMANINI, A. Reutilização de containers de armazenamento e transporte como espaços modulados na arquitetura. 2014, Porto Alegre: [s.n.], 2014.

OLIVAS, I. F. *et al.* PLUG AND PLAY - MODULAR BUILDING SOLUTIONS TO REDUCE LEAD TIME , COST AND INCREASE FLEXIBILITY. 2013, [S.l.]: IEEE, 2013. p. 1–14.

OMRANY, H.; MARSONO, A. K. Optimization of Building Energy Performance through Passive Design Strategies Optimization of Building Energy Performance through Passive Design Strategies. *British Journal of Applied Science & Technology*, v. 13, n. 6, p. 1–16, 2016.

PEREIRA, E. B. *et al.* *Atlas Brasileiro de Energia Solar*. 1. ed. São José dos Campos: INPE, 2006.

PHILIPS. *Luminária de Sobrepor*. Disponível em: <<https://bit.ly/2EYnqBh>>. Acesso em: 11 jun. 2019a.

PHILIPS. *Standard LED bulbs*. Disponível em: <<https://bit.ly/2F5XcNf>>. Acesso em: 12 jun. 2019b.

PLESS, S.; TORCELLINI, P. Getting to Net Zero. *ASHRAE Journal*, n. September, 2009.

PORTAL BRASIL. *Certificados de Depósito Interbancário - CDI*. Disponível em: <<https://bit.ly/2ov2zxG>>. Acesso em: 10 jun. 2019.

RENOVARES. Inveror Canadian Solar CSI-1.5K-TL. Disponível em: <<http://bit.ly/377QGAY>>. Acesso em: 7/2/2020.

RSCP, (RESIDENTIAL SHIPPING CONTAINER PRIMER). *SHIPPING CONTAINER STRUCTURAL COMPONENTS AND TERMINOLOGY*. Disponível em: <<https://bit.ly/3252dj7>>. Acesso em: 3 jul. 2019.

SANTAMOURIS, M. **Solar thermal technologies for buildings: the state of the art**. Abingdon: Earthscan from Routledge, 2014.

SCHIAVONI, S. *et al.* A nZEB housing structure derived from end of life containers : Energy , lighting and life cycle assessment. *Building Simulation*, n. August, 2016.

SMITH, J. D. *Shipping Containers as Building Components*. 2006. 158 f. University of Brighton, 2006.

SOLAR, M. C. Minha Casa Solar. Disponível em: <<https://www.minhacasasolar.com.br/>>. Acesso em: 18/1/2020.

STANDARDIZATION, I. O. FOR. *Series 1 freight containers - Specification and testing - Part 1: General cargo containers for general purposes*. . Switzerland: [s.n.], 1990

STANDARDIZATION, I. O. FOR. *Series 1 freight containers — Classification, dimensions and ratings*. . Switzerland: [s.n.], 2013

STEELSS, S. S. S. *Corten B*. Disponível em: <<http://www.steelss.com/Carbon-steel/corten-b.html>>. Acesso em: 18 abr. 2019.

SUN, Z.; MEI, H.; NI, R. Overview of Modular Design Strategy of the Shipping Container Architecture in Cold Regions. 2017, Suzhou, China: [s.n.], 2017.

TANYER, A. M.; TAVUKCUOGLU, A.; BEKBOLIEV, M. Assessing the airtightness performance of container houses in relation to its effect on energy efficiency. *Building and Environment*, v. 134, n. April 2018, p. 59–73, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.02.026>>.

TUMMINIA, G. et al. Life cycle energy performances and environmental impacts of a prefabricated building module. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 92, p. 272–283, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.059>>.

UNITED NATIONS (UN). *Earth Summit: Agenda 21, The United Nations Programme of Action from Rio*. . Rio de Janeiro, RJ: [s.n.], 1992.

UNITED NATIONS (UN) SYSTEM TASK TEAM ON THE POST-2015 UN DEVELOPMENT AGENDA. *Realizing the Future We Want for All. Report to the Secretary-General*. . [S.l: s.n.], 2012.

VIJAYALAXMI, J. Towards sustainable architecture - A case with Greentainer Local Environment: The International Journal of Justice and Sustainability Towards sustainable architecture – a case with. *Local Environment: The International Journal of Justice and Sustainability*, v. 15, n. February, p. 245–259, 2010.

WEISS, W.; SPORK-DUR, M. *Solar Heat Worldwide*. 2019. ed. Gleisdorf, Austria: IEA Solar Heating & Cooling Programme (SHC), 2019.

WEISSENBERGER, M.; JENSCH, W.; LANG, W. The convergence of life cycle assessment and nearly zero-energy buildings: The case of Germany. *Energy & Buildings*, v. 76, p. 551–557, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.028>>.

WETTER, M. Design optimization with GenOpt Design Optimization with GenOpt. *Building Energy Simulation User News*, v. 21, n. September/October, 2000.

WETTER, M. **Generic Optimization Program. User Manual Version 2.1.0**. 2.1.0 ed. California, United States: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2008.

WILLIAMS, J.; MITCHELL, R.; RAICIC, V.; et al. Less is more: A review of low energy standards and the urgent need for an international universal zero energy standard. *Journal of Building Engineering*, v. 6, p. 65–74, 2016. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2016.02.007>>.

ZHANG, G.; SETUNGE, S.; ELMPT, S. VAN. Using shipping containers to provide temporary housing in post- disaster recovery: Social case studies. *Procedia Economics and Finance*, v. 18, n. September, p. 618–625, 2014. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S2212-5671\(14\)00983-6](http://dx.doi.org/10.1016/S2212-5671(14)00983-6)>.