

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA

ESCALONAMENTO INTELIGENTE DO CONSUMO DE ENERGIA
ELÉTRICA EM FUNÇÃO DE DIFERENTES IMPOSIÇÕES DE
CONFORTO TÉRMICO E APROVEITAMENTO DE ENERGIA
SOLAR

ANDRÉ LUIZ AMORIM DA FONSECA

São Carlos

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA

Escalonamento Inteligente do Consumo de Energia Elétrica em Função
de Diferentes Imposições de Conforto Térmico e Aproveitamento de
Energia Solar

ANDRÉ LUIZ AMORIM DA FONSECA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Urbana.

Orientação: Prof. Dr. Ricardo Augusto Souza Fernandes

Coorientação: Prof.^a Dr.^a Karin Maria Soares Chvatal

São Carlos

2022

Fonseca, André Luiz Amorim da

Escalonamento inteligente do consumo de energia elétrica em função de diferentes imposições de conforto térmico e aproveitamento de energia solar / André Luiz Amorim da Fonseca -- 2022.
129f.

Tese de Doutorado - Universidade Federal de São Carlos, campus São Carlos, São Carlos

Orientador (a): Ricardo Augusto Souza Fernandes
Banca Examinadora: Ricardo Augusto Souza Fernandes, Benvindo Rodrigues Pereira Júnior, Victor Figueiredo Roriz, Flávia Maria de Moura Santos, Fabbio Anderson Silva Borges
Bibliografia

1. Cidades Inteligentes. 2. Resposta a demanda. 3. Automação residencial. I. Fonseca, André Luiz Amorim da. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Ronildo Santos Prado - CRB/8 7325



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana

Folha de Aprovação

Defesa de Tese de Doutorado do candidato André Luiz Amorim da Fonseca, realizada em 25/02/2022.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Ricardo Augusto Souza Fernandes (UFSCar)

Prof. Dr. Benvindo Rodrigues Pereira Junior (USP)

Prof. Dr. Victor Figueiredo Roriz (USP)

Profa. Dra. Flávia Maria de Moura Santos (UFMT)

Prof. Dr. Fábio Anderson Silva Borges (UESPI)

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

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana.

*"Quando nasceste, ao teu redor
todos riam, só tu choravas.
Faze por viver de tal modo que,
à hora de tua morte,
todos chorem, só tu rias."
Confúcio*

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, inteligência suprema, causa primária de todas as coisas, sem Ele nada disto seria possível e nem existiria. Depois aos meus amados pais, Jan e Dorinha, que me proporcionaram as condições e apoio para os estudos desde a infância até os dias atuais e ambos constituem exemplos de trabalho: minha mãe como servidora pública e meu pai como engenheiro. Isto posto, agradeço ao professor Ricardo Augusto Souza Fernandes, que me deu a oportunidade de desenvolver este doutorado e muito ensinou com sua maturidade científica espetacular e genialidade em observar os atalhos, e orientar as tarefas para o desenvolvimento da pesquisa, peço perdão pelas teimosias que tive e que só confirmaram sua sabedoria, também pela dificuldade de entregar as correções finais, pois os desafios da situação do professor após a pandemia foram grandes.

Não menos importante neste processo foi a doce professora Karin Maria Soares Chvatal, que me deu suporte na construção metodológica envolvendo sua especialidade em eficiência energética e conforto térmico nas edificações. Sua entrada na coorientação agregou no aumento da relevância do trabalho, e para o processo de mudança metodológica devido a infortúnios da pandemia sua presença foi essencial, auxiliando na escolha das cidades e no delineamento da aplicação proposta.

Agradeço aos colegas Leonel, Wanessa, Frederico, Andréa, Victor e Gabriel pela convivência na época que estávamos presencialmente na UFSCar no âmbito da orientação do professor Ricardo, que "cobra o escanteio e corre para cabecear" e na época orientava estes e mais outros colegas. Presto agradecimento especial também ao colega Diego Luiz Cavalcá pelas ajudas com o modelo matemático e o algoritmo de otimização por metaheurísticas (Algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas com Mecanismo de Correção pelo Gradiente Estocástico, tema de seu mestrado) que acabamos não utilizando, mas foi essencial para a compreensão da modelagem do problema que aprimoramos neste trabalho.

Agradeço aos professores que toparam constituir a banca de defesa desta temática que é transversal e multidisciplinar, ao professor Benvindo (SEL/USP) que foi professor na disciplina sobre metaheurísticas aplicadas a problemas de engenharia elétrica na USP (SEL/USP/PPGEE), ao professor Victor Roriz que foi um dos professores em Balanço

Energético das Edificações também na USP (IAU), ambos estiveram desde a qualificação do trabalho. Também presto congratulações para a professora Flávia que foi uma das tutoras na disciplina de Conforto Térmico, ainda quando estive no mestrado e aceitou fazer parte da banca e ao professor Fáblio que prontamente se dispôs a ser membro dela. Agradeço a todos pelas contribuições dadas que enriqueceram o trabalho.

Agradeço aos servidores da UFSCAr Antônio Pepino e Alex Rogério Silva que estiveram na secretaria do PPGEU em sequência no período que estive como estudante, pela presteza nas informações e auxílio dado, especialmente ao Alex pela atenção especial que sempre nos direcionou e com quem tive mais contato. Também aos coordenadores do programa Erich Kellner e posteriormente ao professor Érico Masiero de quem também tive o prazer de ser aluno.

Agradeço aos meus colegas do Departamento de Engenharia Elétrica e Automação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso, Campus Cuiabá-Cel. Octayde Jorge da Silva (DEEA/IFM-CBA), que seguraram aos pontas durante meu afastamento. Aos colegas do laboratório de pesquisa, carinhosamente conhecido como "Caverna", ao nosso líder veterano Walterley e aos queridos Saulo, Lu e Aninha que me auxiliaram em projetos de pesquisas que foram fundamentais para alcançar a pontuação necessária para o afastamento para esta capacitação.

Não posso esquecer de agradecer a ajuda dos colegas Guilherme Spavieri que me auxiliou no primeiro artigo dos resultados, dividindo a labuta das tarefas em geral, produção de gráficos e escrita e também do Pós-Doutorando em Engenharia Elétrica Juan Camilo López Amézquita que deu uma força no final da pesquisa em ajustes no modelo de otimização para 96 passos de tempo, sendo tal correção primordial para obtenção dos resultados finais.

E por fim, agradeço a minha amada, querida esposa e eterna namorada Priscila que topou se mudar comigo para São Carlos nesta jornada, mesmo não tendo nada certo (pelo menos no primeiro momento) para fazer seu mestrado, mas enfim conseguiu seu título de Mestre em Psicologia. Voltamos para Cuiabá com sentimento de missão cumprida, com apoio mútuo nas tarefas necessárias para os resultados que deram frutos e vão continuar dando. Sem você para me apoiar nos momentos difíceis esta tese não seria possível, pois o doutorado foi um desafio muito grande e às vezes foi você quem cuidou das outras coisas para que eu pudesse ficar horas seguidas na frente do computador trabalhando.

Resumo

FONSECA, A. L. A. da **Escalonamento Inteligente do Consumo de Energia Elétrica em Função de Diferentes Imposições de Conforto Térmico e Aproveitamento de Energia Solar**. 2022. 129p. Tese (Doutorado) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, São Carlos, 2022.

A partir do desenvolvimento tecnológico em todo o mundo, novas soluções são buscadas para um melhor aproveitamento dos recursos naturais, incluindo os recursos que servem como fonte de geração de energia elétrica. Uma das maneiras mais eficientes para reduzir a demanda no setor residencial no contexto de redes elétricas inteligentes é por meio do uso de métodos de Resposta à Demanda, os quais são responsáveis por controlar direta ou indiretamente o uso da energia elétrica nas edificações. Entretanto, os módulos de escalonamento de consumo têm considerado apenas os equipamentos de ar-condicionado para alcançar o conforto térmico ou deixam de lado a preocupação com a manutenção desta condição dos ocupantes. A partir disso, o objetivo principal desta tese é construir e analisar a aplicação de escalonamento residencial de consumo de eletricidade do programa de resposta à demanda da modalidade tarifária denominada tarifa horária branca. A proposta considera simultaneamente a manutenção do conforto térmico, o aproveitamento de energia solar fotovoltaica e térmica, a gestão de bateria residencial e o escalonamento do consumo para minimização da fatura diária de energia elétrica. Assim, foi considerada uma residência produzida com premissas de arquitetura bioclimática adequada ao clima de cada uma das oito zonas bioclimáticas brasileiras. Em um segundo momento, foram avaliados diferentes cenários de tarifa horária branca em comparação à tarifação convencional. Para a obtenção de parâmetros de consumo das residências foram usados dados de pesquisa pública relacionada à posse de equipamentos e hábitos de consumo no Brasil. A abordagem propõe o uso da carta bioclimática de Givoni a países em desenvolvimento e de clima quente como mecanismo de decisão entre as alternativas de climatização a serem utilizadas como parâmetro de entrada em um problema de otimização de escalonamento do consumo dos eletrodomésticos ao longo do dia, bem como o intercâmbio energético da bateria com a rede e o aproveitamento solar fotovoltaico e térmico. Os resultados encontrados nos testes indicam a viabilidade da solução proposta para a maioria dos dias analisados, obtendo até 100% de economia, ou seja, situações em que um valor nulo de fatura diária é obtido, deixando parcelas de consumo de eletricidade a serem compensadas. O aproveitamento solar dentro da proposta reforça a importância dessa matriz energética e indica para quais cidades e condições climáticas o mecanismo proposto é mais adequado.

Palavras-chave: Cidades inteligentes, resposta à demanda, automação residencial, sistemas inteligentes, sustentabilidade urbana.

Abstract

FONSECA, A. L. A. da **Intelligent Scheduling of Electricity Consumption Due to Different Impositions of Thermal Comfort and Solar Energy Use.** 2022. 129p. Tese (Doutorado) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, São Carlos, 2022.

From the technological development around the world, new solutions are sought for better use of natural resources, including the resources that serve as a source of electricity generation. One of the most efficient ways to reduce demand in the residential sector in the context of smart grids is using Demand Response methods, which are responsible for directly or indirectly controlling the use of electricity in buildings. However, consumption scheduling modules have only considered air conditioning equipment to achieve thermal comfort or leave aside the concern with maintaining this condition of the occupants. From this, the main objective of this thesis is to build and analyze the application of residential electricity consumption scheduling for demand response programs, considering the tariff modality named as white tariff. The proposal simultaneously considers the maintenance of thermal comfort, the use of photovoltaic and thermal solar energy, the management of the residential battery, and consumption scheduling to minimize the daily electricity costs. Thus, the work considered a residence produced with premises of bioclimatic architecture suitable for the climate of each of the eight Brazilian bioclimatic zones. In a second step, different scenarios of the white hourly tariff were evaluated in comparison to conventional tariffs. To obtain residential consumption parameters, public research data related to equipment ownership and consumption habits in Brazil were used. The approach proposes the use of the Givoni bioclimatic chart for hot developing countries as a decision mechanism between the air conditioning alternatives to be used as an input parameter in a problem of optimization of the scheduling consumption of household appliances throughout the day, as well as the energy exchange of the battery with the grid and the photovoltaic and thermal solar use. The results found in the tests indicate the feasibility of the proposed solution for most of the days analyzed, obtaining up to 100% savings, that is, situations in which a null value of the daily cost is obtained, leaving portions of electricity consumption to be compensated. The use of solar energy within the proposal reinforces the importance of this energy type and indicates which cities and climatic conditions the proposed mechanism is most suitable for.

Keywords: Smart cities, demand response, home automation, smart systems, urban sustainability.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Definição e Delimitação do Problema de Pesquisa	4
1.2	Justificativa	7
1.3	Hipótese	9
1.4	Objetivos	9
1.5	Organização do Trabalho	10
2	Fundamentação Teórica	13
2.1	Cidades, Redes Elétricas e Edificações Inteligentes	13
2.2	Gerenciamento da Energia pelo Lado da Demanda	14
2.3	Resposta à Demanda	16
2.4	Manutenção do Conforto Térmico em Edificações	21
2.4.1	Índices de Conforto Térmico	23
2.4.2	Índices de Conforto Térmico Aplicados em Programas de Resposta à Demanda	27
2.5	Sustentabilidade e Uso de Recursos Energéticos em Edificações	29
2.5.1	Aquecimento Solar Passivo	29
2.5.2	Sistema de Aquecimento de Água	31
2.5.3	Geração Fotovoltaica	32
2.6	Escalonamento do Consumo de Energia Elétrica	32
3	Metodologia	35
3.1	Estrutura Metodológica Proposta	36
3.2	Modelo de Otimização Adaptado ao Problema Proposto	37
3.3	Classificação Estratégica e Consumo Basal Imposto	42
3.4	Esquema de Escalonamento e Comparativos Propostos	48
3.4.1	Concepção e Operação do Escalonamento	49
3.4.2	Comparativos de Cenários na Tarifa Convencional	52
3.5	Escolha das Cidades para as Análises Propostas	53
3.5.1	Cidade para Aplicação em 24 Passos de Tempo	53
3.5.2	Escolha das Cidades para Distintas Zonas Bioclimáticas Brasileiras	56
3.6	Dimensionamento e Considerações sobre o Aproveitamento da Energia Solar	60
3.6.1	Aproveitamento Solar na Aplicação em 24 Passos de Tempo	63
3.6.2	Aproveitamento Solar nas Aplicações em 96 Passos de Tempo	65
3.7	Considerações Sobre a Bateria Residencial	69
3.8	Parâmetros dos Eletrodomésticos e Equipamentos de Climatização	70
3.8.1	Eletrodomésticos para Aplicação em 24 Passos de Tempo	71

3.8.2	Eletrodomésticos para Aplicação em 96 Passos de Tempo	73
4	Resultados e Discussões	79
4.1	Escalonamento ótimo em 24 Passos de Tempo na Cidade de Brasília-DF . . .	79
4.1.1	Análise Climática de Brasília-DF para 24 Passos de Tempo	80
4.1.2	Faturas Diárias na Aplicação em 24 Passos de Tempo	82
4.1.3	Balances Energéticos na Aplicação em 24 Passos de Tempo	83
4.1.4	Análise Comparativa dos Cenários na Aplicação em 24 Passos de Tempo	85
4.2	Escalonamento Ótimo para Cidades das Distintas Zonas Bioclimáticas Brasileiras	90
4.2.1	Análises Climáticas das Oito Cidades Escolhidas	90
4.2.2	Faturas Diárias nas Oito Cidades Escolhidas	93
4.2.3	Balances Energéticos nas Oito Cidades Escolhidas	94
4.2.4	Análise Comparativa dos Cenários nas Oito Cidades Escolhidas . . .	101
4.2.5	Compensações de Consumo de Energia Elétrica nas Oito Cidades Escolhidas	109
5	Conclusões	113
5.1	Proposição de Trabalhos Futuros	114
5.2	Trabalhos Publicados e em Fase de Submissão	115
	Referências	117

Lista de figuras

Figura 1 – Estrutura conceitual do DSM.	15
Figura 2 – Curva de demanda de energia elétrica diária de uma residência típica no Brasil.	16
Figura 3 – Postos tarifários das concessionárias do estado do Paraná (PR) e do estado do Amazonas (AM).	19
Figura 4 – Aspectos influentes na adesão dos consumidores a programas de DR.	21
Figura 5 – Sumário de benefícios das dimensões da sustentabilidade em programas de DR.	30
Figura 6 – Regiões de aquecimento solar na carta bioclimática atualizada de Givoni (1992).	31
Figura 7 – Diagrama esquemático da metodologia executada.	37
Figura 8 – Ilustração da carta bioclimática para e Givoni (1992) para países em desenvolvimento de clima quente.	43
Figura 9 – Linhas e curvas das variáveis climáticas na carta psicrométrica.	45
Figura 10 – Complemento de regras para a zona de ventilação.	45
Figura 11 – Agrupamento implementado das estratégias.	47
Figura 12 – Agregação de dados e considerações para concepção da proposta.	49
Figura 13 – Mecanismo e fluxos do escalonamento para uma unidade residencial.	50
Figura 14 – Tarifas consideradas para aplicação na cidade de Brasília-DF.	55
Figura 15 – Descrição da geração fotovoltaica nos dias de 2019(a) e 2020(b) para a aplicação em 24 passos de tempo.	65
Figura 16 – Balanço energético do ano de 2019.	84
Figura 17 – Balanço energético do ano de 2020.	85
Figura 18 – Análise comparativa de faturas da casa bioclimática do escalonamento da casa bioclimática.	86
Figura 19 – Economia financeira percentual do cenário inteligente e sustentável na casa bioclimática em relação aos demais cenários.	87
Figura 20 – Economia financeira da casa bioclimática com resfriamento evaporativo.	88
Figura 21 – Compensação de energia no cenário inteligente e sustentável e na tarifa convencional.	89
Figura 22 – Balanços energéticos de Curitiba-PR (Zona 1, 2008) para os dois dias de teste.	94
Figura 23 – Balanços energéticos de Santa Maria-RS (Zona 2, 2003) para os dois dias de teste.	96

Figura 24 – Balanços energéticos de São Paulo-SP (Zona 3, 2008) para os dois dias de teste.	96
Figura 25 – Balanços energéticos de Brasília- DF (Zona 4, 2001) para os dois dias de teste.	97
Figura 26 – Balanços energéticos de Governador Valadares- MG (Zona 5, 2009) para os dois dias de teste.	98
Figura 27 – Balanços energéticos de Campo Grande-MS (Zona 6, 2008) para os dois dias de teste.	99
Figura 28 – Balanços energéticos de Teresina-PI (Zona 7, 2006) para os dois dias de teste.	100
Figura 29 – Balanços energéticos de Manaus-AM (Zona 8, 2008) para os dois dias de teste.	101
Figura 30 – Comparativo das faturas dos cenários de Curitiba-PR (Zona 1, 2008).	103
Figura 31 – Comparativo das faturas dos cenários de Santa Maria-RS (Zona 2, 2003).	104
Figura 32 – Comparativo das faturas dos cenários de São Paulo-SP (Zona 3, 2008).	104
Figura 33 – Comparativo das faturas dos cenários de Brasília-DF (Zona 4, 2001).	105
Figura 34 – Comparativo das faturas dos cenários de Governador Valadares-MG (Zona 5, 2009).	106
Figura 35 – Comparativo das faturas dos cenários de Campo Grande-MS (Zona 6, 2008).	107
Figura 36 – Comparativo das faturas dos cenários de Teresina-PI (Zona 7, 2006).	107
Figura 37 – Comparativo das faturas dos cenários de Manaus-AM (Zona 8, 2008).	108
Figura 38 – Saldos a compensar de cenários no dia 2 de Governador Valadares-MG (Zona 5, 2009).	111
Figura 39 – Saldos a compensar de cenários no dia 2 de Campo Grande-MS (Zona 6, 2008).	111
Figura 40 – Saldos a compensar de cenários no dia 2 de Teresina-PI (Zona 7, 2006).	112

Lista de tabelas

Tabela 1 – Sumário de características climáticas das cidades consideradas: parte 1.	58
Tabela 2 – Sumário de características climáticas das cidades consideradas: parte 2.	58
Tabela 3 – Tarifas horária branca e convencional para cada cidade considerada. . .	59
Tabela 4 – Resoluções ANEEL, concessionárias e configurações dos postos tarifários.	59
Tabela 5 – Parâmetros do painel fotovoltaico considerado na aplicação em 24 passos de tempo.	64
Tabela 6 – Parâmetros do painel fotovoltaico considerado nas aplicações em 96 passos de tempo.	66
Tabela 7 – Parâmetros e resultados de dimensionamento das UFVs das oito cidades.	66
Tabela 8 – Parâmetros e resultados do cálculo de volume de água quente nas oito cidades.	67
Tabela 9 – Parâmetros e resultados do cálculo do SAS nas oito cidades.	69
Tabela 10 – Parâmetros da bateria residencial para aplicações em 24 em 96 passos de tempo.	70
Tabela 11 – Parâmetros de eletrodomésticos na aplicação de 24 passos - ano de 2019.	72
Tabela 12 – Parâmetros de eletrodomésticos na aplicação de 24 passos - ano de 2020.	72
Tabela 13 – Parâmetros dos eletrodomésticos flexíveis das zonas bioclimáticas 1 a 4.	75
Tabela 14 – Parâmetros dos eletrodomésticos flexíveis das zonas bioclimáticas 5 a 8.	75
Tabela 15 – Parâmetros dos eletrodomésticos fixos das zonas bioclimáticas 1 a 4. .	76
Tabela 16 – Parâmetros dos eletrodomésticos fixos das zonas bioclimáticas 5 a 8. .	76
Tabela 17 – Equipamentos empregados para manutenção de conforto para as 8 zonas.	77
Tabela 18 – Sumário do custo-conforto para cada passo de tempo.	77
Tabela 19 – Estratégias na carta bioclimática conforme Analysis Bio v.2.2 (ONO, 2010) e filtros elaborados no R (R Core Team, 2019).	80
Tabela 20 – Estratégias agrupadas conforme filtros elaborados.	81
Tabela 21 – Dias escolhidos para as aplicações do escalonamento em 2019 e 2020. .	81
Tabela 22 – Faturas diárias de consumo de energia elétrica obtidas.	82
Tabela 23 – Faturas diárias de consumo de energia elétrica obtidas para as oito zonas .	93

Lista de quadros

Quadro 1 – Sumário dos índices de conforto térmico.	26
Quadro 2 – Variáveis dos índices de conforto térmico do Quadro 1.	27

Lista de siglas e abreviaturas

ABC	<i>Artificial Bee Colony</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Ar-condicionado
ACLPS	<i>Adaptive Consumption-Level Pricing Scheme</i>
ALD	<i>ASHRAE Likelihood of Dissatisfied</i>
AmE	Amazonas Energia
AMI	<i>Advanced Metering Infrastructure</i>
AMPL	<i>A Mathematical Programming Language</i>
AMV	<i>Actual Mean Vote</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
aPMV	<i>Adaptive Predicted Mean Vote</i>
AQC	Aquecimento artificial
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers</i>
BYD	<i>Build Your Dreams</i>
CA	<i>Consumption Allowance</i>
CC/CA	Corrente Contínua / Corrente Alternada
CELPA	Centrais elétricas do Pará
COVID-19	<i>Corona Virus Disease 2019</i>
CPP	<i>Critical Peak Price</i>

CRESESB	Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito
CSV	<i>Cumulated Sacrifice Value</i>
DE	<i>Differential Evolution</i>
DLC	<i>Direct Load Control</i>
DOE	<i>Department Of Energy</i>
DR	<i>Demand Response</i>
DRP	<i>Demand Response Program</i>
DSM	<i>Demand Side Management</i>
EDC	Estado de Carga
EMS	<i>Energy Management System</i>
EPW	<i>Energy Plus Weather</i>
ESS	<i>Energy Storage System</i>
ETP	<i>Equivalent Thermal Parameters</i>
<i>F</i>	Carga Fixa
GA	<i>Genetic Algorithm</i>
HEMS	<i>Home Energy Management System</i>
HVAC	<i>Heating, Ventilation e Air Conditioning</i>
<i>I</i>	Interrompível
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
ML	<i>Machine Learning</i>
MLR	<i>Multiple Linear Regression</i>
NAA	<i>Natural Aggregation Algorithm</i>
NBR	Norma Brasileira

NI	Não-Interrompível
NP	Não-determinístico Polinomial
nZEB	<i>Nearly Zero Energy Buildings</i>
OMBRA	Observatório Meteorológico de Brasília
PIB	<i>Price Invariant Band</i>
PLIM	Programação Linear Inteira Mista
PMV	<i>Predicted Mean Vote</i>
PPD	<i>Predicted Percentage of Dissatisfied</i>
PPH-2019	Pesquisa de Posse e Hábitos de Uso de Equipamentos Elétricos na Classe Residencial 2019
PRFP	Programa Nacional de Conservação de Energia e Eficiência Energética
PROCEL	Programa Nacional de Conservação da Energia Elétrica
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
PSV	Estratégias passivas
RE	Resfriamento evaporativo
RF	<i>Random Forest</i>
RNAs	Redes Neurais Artificiais
RTP	<i>Real Time Pricing</i>
SA	<i>Simulated Annealing</i>
SAS	Sistema de Aquecimento Solar
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SEDC	<i>Smart Energy Demand Coalition</i>
SET	<i>Standard Effective Temperature</i>
SG	<i>Smart Grids</i>
SR	<i>Spinning Reserve</i>

SVR	<i>Support Vector Regression</i>
SWERA	<i>Solar Wind and Energy Resource Assessment</i>
TOU	<i>Time of Use</i>
TRY	<i>Test Reference Year</i>
TSV	<i>Thermal Sensation Vote</i>
UFV	Usina Fotovoltaica
VNT	Ventilação
WPPD	<i>Weighted Predicted Percentage of Dissatisfied</i>

Lista de símbolos

$Custo_d$	Custo financeiro da fatura diária em R\$.
$T_{branca}^{(t)}$	Preço da energia elétrica em cada passo de tempo t , dado em $R\$/kWh$.
N_{t-dia}	Número dos passos de tempo ao longo do dia escolhidos para o escalonamento.
$E_{rede}^{(t)}$	Energia líquida absorvida ou injetada na rede em kWh para cada passo de tempo t .
$E_{bat}^{(t)}$	Interação da bateria com a rede no passo de tempo t em kWh. Pode estar em carga ou descarga, assumindo respectivamente valores positivos ou negativos.
$E_{fix}^{(t)}$	Consumo de eletricidade dos aparelhos eletrodomésticos que não podem ser desligados em cada passo de tempo t em kWh, assim não são escalonáveis.
$E_{conf}^{(t)}$	Consumo dos dispositivos de climatização para garantir o conforto térmico na residência bioclimática no passo de tempo t de acordo com o lançamento de amostra climática externa da carta bioclimática adotada, dado em kWh .
$E_{flex}^{(t)}$	Consumo de aparelhos em cada passo de tempo t que podem ser deslocados. Esses dividem-se em interrompíveis se podem ter seu consumo seccionado ou não interrompíveis se uma vez ligadas devem assim permanecer até o fim do tempo de utilização, dado em kWh .
$E_{boiler}^{(t)}$	Consumo de caráter flexível do sistema de aquecimento elétrico do reservatório de água quente (<i>boiler</i>) da casa no passo de tempo t , que deverá suprir a água quente do próximo dia.
σ	Variável binária que define se o <i>boiler</i> deverá ser acionado no dia corrente ($\sigma = 1$) ou não ($\sigma = 0$), baseado em regra proveniente da

disponibilidade de energia solar para aquecimento de água através de coletores.

- $E_{fv}^{(t)}$ Energia média gerada do sistema fotovoltaico em cada passo de tempo t .
- α_{ap} Passo de tempo inicial da janela de operação de um aparelho eletrodomésticos ap .
- β_{ap} Passo de tempo final da janela de operação de um aparelho eletrodomésticos ap .
- $\delta_{ap}^{(t)}$ Variável binária de decisão que indica o estado operativo de um aparelho eletrodoméstico ap no passo de tempo t , sendo igual a 1 para aparelho ligado e igual a 0 para o aparelho desligado.
- D_{ap} Duração total de passos de tempo t de um aparelho ap ao longo de um dia de escalonamento.
- $E_{T_{ap}}$ Consumo total de energia elétrica de um aparelho eletrodoméstico ap ao longo do dia.
- λ_{ap} Limite de atraso tolerável em passos de tempo t para o início do funcionamento do aparelho eletrodoméstico ap .
- $E_{bat}^{cg(t)}$ Quantidade de energia elétrica de carregamento da bateria no passo de tempo t .
- η_{cg} Eficiência do ciclo de carga da bateria, dada em valor *por unidade*.
- E_{cg}^{max} Quantidade máxima de energia elétrica de carregamento da bateria em um passo de tempo t .
- η_{dcg} Eficiência do ciclo de descarga da bateria, dada em valor *por unidade*.
- E_{dcg}^{max} Quantidade máxima de energia elétrica de descarregamento da bateria em um passo de tempo t .
- $E_{bat}^{dcg(t)}$ Quantidade de energia elétrica de descarregamento da bateria no passo de tempo t .
- $\theta_{cg}^{(t)}$ Variável binária auxiliar que define se a bateria será carregada ou não cada passo de tempo t , auxiliando para limitar a situação de bateria apenas em carga ou apenas em descarga.

$\theta_{deg}^{(t)}$	Variável binária auxiliar que define se a bateria será descarregada ou não cada passo de tempo t , auxiliando para limitar a situação de bateria apenas em carga ou apenas em descarga.
$EDC^{(t)}$	Estado de Carga da bateria no passo de tempo t dada em valor <i>por unidade</i> .
T_{BS}	Temperatura de bulbo seco, conhecida como temperatura do ar, dada em °C.
T_{BU}	Temperatura de bulbo úmido, trata-se da temperatura do ar com o bulbo envolto por uma mecha com água destilada, dada em [°C].
U_{REL}	Razão percentual (%) entre a fração molar do vapor d'água presente na mistura real e a fração molar que o vapor d'água teria se a mistura tivesse saturada à mesma temperatura e pressão total.
U_{ABS}	Taxa entre a massa de vapor de água em relação à massa total de ar seco do mesmo ar dada em $[\frac{g_{vapor\ de\ agua}}{kg_{ar\ seco}}]$.
η	Rendimento do sistema fotovoltaico dado em valor <i>por unidade</i> .
S	Área ou superfície total dos painéis fotovoltaicos da usina em [m^2]
I_S	Irradiação solar global para cada passo em $\frac{kWh}{m^2}$.
$T_a^{(t)}$	Temperatura do ar externo em cada passo de tempo t em °C.
$P_{I_{fv}}$	Potência do sistema a ser instalado em kWp.
I_p	Irradiação solar média diária considerada de projeto da usina fotovoltaica, dada em $[\frac{kWh}{m^2.dia}]$.
$\rho\%$	Rendimento global da UFV de microgeração, dado em %.
V_c	Consumo diário total de água quente na residência expresso em litros (L).
Q_u	Vazão de utilização do aparelho consumidor de água quente expresso em litros por minuto [L/min].
T_u	Tempo de uso médio diário do aparelho, expresso em minutos (<i>min</i>)
f_u	Frequência de uso de um aparelho consumidor de água quente em <i>vezes/dia</i> .

E_u	Energia que, de maneira efetiva, se aproveita em um processo para incrementar a temperatura de um fluido de trabalho, depois de converter a energia solar disponível em energia térmica, sendo dada em quilowatt-hora por mês ($kWh/mês$).
V_{arm}	Volume de armazenamento do reservatório em litros (L).
ρ_a	Massa específica da água igual a 1, expressa em quilogramas por litro (kg/L).
C_p	Calor específico da água igual a 4,18 e é expresso em quilojoules por quilograma grau Celsius ($kJ/kg.°C$).
T_{arm}	Temperatura de armazenamento da água, expressa em graus Celsius ($°C$).
T_{amb}	Temperatura ambiente média anual do local de instalação, expressa em graus Celsius ($°C$).
FC_{inst}	Fator de correção para inclinação e orientação do coletor.
β_c	Inclinação do coletor em relação ao plano horizontal e expressa em graus ($°$).
β_o	Inclinação ótima do coletor para o local de instalação e expressa em graus ($°$).
γ	Ângulo de orientação dos coletores solares em relação ao norte geográfico, expresso em graus ($°$).
A_c	Área total de coletores solares térmicos sendo expressa em metros quadrados (m^2).
I_G	Valor da irradiação global média anual diária para o local de instalação sendo expresso em quilowatts hora por metro quadrado dia ($kWh/m^2.dia$).
P_{MEE}	Produção média mensal de energia específica do coletor solar sendo expressa em quilowatts hora por mês por metro quadrado ($kWh/mês.m^2$) obtido na tabela de eficiência energética do INMETRO.
E_p	Somatório das perdas térmicas dos circuitos primário e secundário sendo expresso em quilowatts hora por mês ($kWh/mês$).

- $I_{T_{dia}}$ Irradiação solar total no dia considerado e se de fato for maior ou igual ao valor adotado no projeto os sistemas expresso em quilowatts hora por metro quadrado dia ($kWh/m^2.dia$).
- ✓ Marcador que indica a presença de um dado eletrodoméstico na residência de uma dada cidade dentre as consideradas.
- ∅ Marcador que indica a ausência de um dado eletrodoméstico na residência de uma dada cidade dentre as consideradas.
- ∧ Variável que indica a posse que poderá ser marcada como positiva com "✓" ou negativa com "∅".
- D Variável de duração de uso dos aparelhos em número de passos de tempo.

Capítulo 1

Introdução

Com o avanço da tecnologia e a possibilidade da geração de eletricidade dentro das edificações urbanas, que se contrapõe ao sistema tradicional de geração centralizada, surgem as denominadas mini e microgeração distribuída, regulamentada pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) por meio da Resolução N°482 (ANEEL, 2012) e posteriormente modificada pela Resolução N° 687 (ANEEL, 2015). Essas resoluções possibilitaram uma mudança nos cenários urbanos no contexto do fluxo de carga das redes de distribuição de energia elétrica que anteriormente possuíam características unidirecionais e aos poucos têm incorporado características bidirecionais.

Mesmo com esses avanços que vão ao encontro da melhoria da qualidade de suprimento de energia elétrica, conforme Altoé et al. (2017), o crescimento do consumo passa a preocupar as autoridades que vislumbram antever futura necessidade de um racionamento de energia elétrica e garantir o crescimento adequado de sua oferta. O horizonte de uma crise eminente é tamanho que o governo federal estabeleceu o sistema tarifação por bandeiras no qual dependendo das situações de disponibilidade de geração hidráulica haverá uma adição maior ou menor de preço na fatura de energia elétrica quanto maior for a necessidade de complementação da matriz energética essencialmente hidráulica pela geração de eletricidade via usinas térmicas (LIMA; PEREZ; CLEMENTE, 2017).

No contexto do desenvolvimento tecnológico, os equipamentos eletrônicos a cada dia vão experimentando uma redução em seus custos a tal ponto que o uso de infraestrutura avançada de medição (AMI, do inglês *Advanced Metering Infrastructure*) de energia elétrica para os consumidores possa ser uma realidade viável ao longo do tempo (CAROPRESO et al., 2019). Segundo Krishnamurti et al. (2012) os medidores inteligentes (SM, do inglês *Smart Meters*) são os agentes impulsionadores das redes elétricas inteligentes (SG, do inglês *Smart Grids*) que com a AMI adequada e segura resultará, neste caso, na aquisição de um arcabouço de informações que possibilitarão um uso ainda mais racional da energia elétrica a partir de informações em tempo real ou comunicações de um dia a frente, viabilizando a

intervenção direta ou indireta no consumo conforme a necessidade dos fornecedores de energia elétrica.

De uma maneira generalista, a intervenção feita no consumo, por meio de programas de eficiência energética implementados pelas concessionárias de distribuição de energia elétrica ou pelos consumidores é denominada como gerenciamento pelo lado da demanda (DSM, do inglês *Demand Side Management*) e, de acordo com [Palensky e Dietrich \(2011\)](#), apresentam quatro técnicas principais que economia de energia e manutenção de condições adequadas da qualidade da energia elétrica, a saber:

1. Eficiência energética – esta estratégia propõe a substituição e o uso de equipamentos com menor consumo de energia elétrica para a mesma realização de trabalho, contemplando um melhor rendimento do sistema de condicionamento de ar, aproveitamento de recursos naturais para iluminação, ventilação ou aproveitamento direto para aquecimento da água, entre outras ações;
2. Horário de uso (TOU, do inglês *Time-of-use*) – técnica que consiste em fixar para determinado horário um preço da tarifa energética com o intuito de impactar na redução da demanda nesse horário;
3. Resposta a Demanda (DR, do inglês *Demand Response*) – consiste no manuseio do consumo por meio de atitudes que se desdobram na variação do preço de energia elétrica (via tarifação ou mercado de energia) para períodos em que o sistema esteja sobrecarregado (controle indireto de cargas) e também no controle direto de carga (DLC, do inglês *Direct Load Control*), efetuando desligamento de cargas específicas dos consumidores de energia elétrica e dando aos mesmos incentivos pela manutenção de tal controle;
4. Reserva de giro (SR, do inglês *Spinning Reserve*) – é a resiliência energética proveniente de geradores conectados a um dado sistema elétrico para aumentos repentinos de carga. Este adicional de potência de reserva é obtido por meio de aumento de torque no rotor das turbinas dos geradores.

Alguns autores, tais como [Gellings e Chamberlin \(1988\)](#) e [Camargo e Teive \(2006\)](#), consideram que o TOU também é um tipo de DR, uma vez que a variação horária no tempo de maior demanda por energia faz com que os consumidores desloquem seu consumo de energia elétrica, em uma lei econômica conhecida como elasticidade da demanda. Para [Camargo e Teive \(2006\)](#), quanto maior a consciência ecológica e social da população melhor serão os resultados na aplicação da DR por algum tipo de controle indireto, tal qual a variação tarifária.

A estratégia denominada como DLC se torna muito atraente do ponto de vista da concessionária, pois dá a ela o poder de garantir o desligamento das cargas, impactando rapidamente nos níveis de potência demandada de seus alimentadores. Entretanto, o controle indireto via tarifação se torna uma opção menos invasiva ao consumidor que deverá decidir se irá ou não manter seus equipamentos ligados em um horário de alto custo da eletricidade.

Alguns dos programas de DR existentes relatam a preocupação com o conforto térmico dos habitantes de cada residência (WONG, 2015). No entanto, geralmente, as pesquisas que anunciam esta preocupação trabalham com controle de sistema central de aquecimento, ventilação e ar-condicionado (HVAC, do inglês Heating, Ventilation and Air Conditioning) e se baseiam em condições climáticas internas de conforto, fazendo assim o ajuste de temperatura de bulbo seco do ar no interior da edificação. Tal abordagem deixa de lado estratégias de climatização mais baratas, tais quais a ventilação mecânica e o resfriamento evaporativo que, conforme Camargo (2009), é uma técnica de climatização que consiste na utilização da evaporação da água através da passagem de um fluxo de ar para redução da temperatura. Essa técnica possui como atrativos o baixo consumo de energia elétrica e facilidade na instalação, manutenção e operação.

Os estudos de Vasudevan e Swarup (2016) propõem um programa de DR considerando cargas elétricas prioritárias e, entre elas, inclui o sistema de HVAC para a manutenção do conforto térmico. Entretanto, há a imposição de uma restrição definida pelo voto médio predito (PMV, do inglês *Predicted Mean Vote*).

Por outro lado, Korkas et al. (2016) trabalham com DLC agregado, efetuando simulações de três edificações distintas, sendo a primeira de atividades industriais, a segunda um escritório e a terceira uma residência. Os autores também incluem na proposta de controle fontes renováveis de geração de energia elétrica, basicamente via turbina eólica e painéis fotovoltaicos, adicionando também um armazenador de energia e agendamento de ocupação como variáveis influentes. Para tanto, fizeram uso de simulação termoenergética pelo software *Energy Plus*. O controle também é limitado a apenas condicionadores de ar e seu método de avaliação do conforto também utiliza o PMV, em conformidade com a norma europeia (ISO, 2005).

Tratando-se da questão do impacto do uso de programas de DR via tarifação, o estudo de Cetin, Manuel e Novoselac (2016) analisou os impactos no conforto térmico provenientes da aplicação de um programa de DR do tipo TOU, evidenciando os sacrifícios dispendidos para a obtenção dos resultados que são objetos do DSM. De acordo com Santos (2011), as tarifações TOU são os tipos de programas de DR mais utilizados tanto para unidades consumidoras residenciais quanto comerciais e industriais. O autor ressalta que, em 2006, uma pesquisa realizada com empresas de energia nos Estados Unidos demonstrou que o TOU preponderou com 78,5% de ocorrência.

Em termos do controle indireto ou direto da demanda não é possível desconsiderar os produtores independentes que podem auxiliar na problemática através do fornecimento de eletricidade para microrregiões, melhorando total ou parcialmente o suprimento de energia elétrica (BLUMSACK; FERNANDEZ, 2012). A presença do aproveitamento da energia proveniente de fontes renováveis pode influenciar diretamente o preço da energia elétrica, especialmente a energia solar, segundo Ruppert et al. (2016), que a cada dia se torna mais acessível aos consumidores residenciais e possibilita a inclusão de armazenamento energético através de bateria residencial. Por outro lado, o uso de chuveiros elétricos em habitações residenciais destaca-se como altamente influente no pico de energia elétrica, conforme relatado por Prado e Gonçalves (1998). Desta forma, o aproveitamento direto da energia solar térmica para aquecimento de água, bem como o uso de *boiler* fora do horário de pico e armazenamento de água quente contribuem diretamente para a redução do consumo de chuveiros elétricos no horário de pico de demanda residencial, principalmente em locais com alta disponibilidade de energia solar.

Neste contexto, a presente tese propõe o desenvolvimento e análise da aplicação de um instrumento de otimização que possa efetuar o escalonamento de consumo energético dos eletrodomésticos que poderão ser ligados de acordo com as situações climáticas e de energia elétrica, efetuando simultaneamente a manutenção do conforto térmico. A proposta também lança mão de gestão de bateria residencial, aproveitamento de energia solar tanto para a geração fotovoltaica quanto para o aquecimento do ambiente e de água, considerando a retaguarda de uso de *boiler* e armazenamento de água quente com aplicação da tarifa horária branca vigente nos locais de estudo, sendo oito cidades selecionadas dentro de cada uma das oito zonas bioclimáticas brasileiras. Essas ações visam um impacto direto na redução da demanda por eletricidade de pico solicitada pela concessionária, reduzindo a fatura de energia elétrica dos consumidores em contraposição da aplicação da tarifação convencional. Para mensurar os impactos da inserção das ações de DR serão efetuados comparativos numéricos de desempenho com cenários similares devidamente configurados na tarifação convencional, ou seja, preço constante e único.

1.1 Definição e Delimitação do Problema de Pesquisa

A pesquisa proposta constrói uma solução que preconiza o uso de estratégias bioclimáticas como premissa para que a carta bioclimática atualizada para países em desenvolvimento e de clima quente de Givoni (1992) seja aplicada como mecanismo de decisão assertivo dos equipamentos a serem utilizados para o conforto térmico, ou ainda, a dispensabilidade do uso de qualquer um deles. Sendo assim, foi pressuposto que o projeto arquitetônico esteja concebido adequadamente para atender cada uma das estratégias bioclimáticas decorrentes da carta de acordo com o clima externo, sendo que os

materiais do envelope construtivo estejam corretamente selecionados, os equipamentos de climatização adequadamente dimensionados e com uma automação residencial adequada para acionar os equipamentos impostos para carta bioclimática para cada passo de tempo de escalonamento.

Primeiramente, uma aplicação foi efetuada considerando a cidade de Brasília-DF com passos de escalonamento horários, considerando dois anos de estudo com modificações do uso e posse dos eletrodomésticos mais utilizados e a ocupação dos moradores da residência entre esses anos. Diante da pandemia de COVID-19 (do inglês *Coronavirus Disease*) dois cronogramas de ocupação e características de uso dos eletrodomésticos foram considerados, um para o ano de 2019 e outro para o ano de 2020. Cabe comentar que, para essa primeira aplicação, apenas o aproveitamento da energia solar fotovoltaica e estratégia de climatização passiva foram considerados.

Posteriormente, compararam-se cenários de DR na tarifa horária branca com cenários simulados hipotéticos na tarifação convencional para oito cidades brasileiras, sendo cada uma delas representando uma das oito zonas bioclimáticas. A escolha das cidades baseou-se em variáveis como o número de habitantes, favorecendo uma distribuição balanceada no território brasileiro e em suas regiões, partindo das capitais. A análise efetuada constitui um cenário completo pautado na inteligência e na sustentabilidade, incluindo recursos de conexão à rede elétrica, aproveitamento de energia solar para geração de energia elétrica, aquecimento de água e aquecimento passivo, armazenamento de eletricidade por meio de bateria, ocupação dos habitantes e suas preferências e gestão pelo sistema inteligente proposto.

Tal sistema atuaria no agendamento funcional dos eletrodomésticos em prol de um balanço dos recursos energéticos residenciais. O mecanismo de escalonamento partiria de uma curva de consumo basal dos dispositivos empregados na climatização considerando diferentes estratégias presentes na carta bioclimática brasileira com aplicação da tarifa horária branca, já disponível no Brasil em 2020. A referida curva de consumo basal representa o consumo energético dos dispositivos de climatização necessários para manter o conforto térmico no interior de cada residência em estudo de acordo com a carta bioclimática atualizada de [Givoni \(1992\)](#) através do lançamento de cada amostra climática em seu respectivo passo de tempo na referida carta. Por outro lado, os demais cenários na tarifa convencional serão simulados acrescentando recursos de aproveitamento de energia solar, emprego de *boiler*, chuveiro e torneiras com ou sem aquecimento elétrico.

Para a obtenção de dados de cronograma de ocupação dos usuários, relação de eletrodomésticos, hábitos de consumo e preferências foram considerados dados da Pesquisa de Posse e Hábitos de Uso de Equipamentos Elétricos na Classe Residencial 2019 (PPH-2019) ([ELETROBRÁS, 2019](#)).

O mecanismo do sistema proposto visa a obtenção de curvas basais com a classificação determinística na carta bioclimática para obter as estratégias a serem empregadas na manutenção do conforto térmico diretamente através do lançamento das amostras nos passos de tempo na referida carta considerando a estratégia ativa ou passiva sugerida por ela a ser adotada em cada passo. A partir das necessidades mínimas de conforto térmico fixadas nos passos de tempo, um mecanismo de otimização pautado na gestão de bateria residencial e no uso dos eletrodomésticos visa minimizar o preço da fatura diária de energia elétrica. O conceito de imposição é utilizado, pois estes equipamentos são considerados como cargas fixas (impostas) que não podem ser deslocadas e, portanto, são ajustadas para atender à exigência de conforto térmico de acordo com padrões pré-estabelecidos para suas utilizações.

Subsequentemente, foram efetuados comparativos entre vários cenários equivalentes na tarifa convencional de preço constante para cada cidade brasileira selecionada. A proposta visa evidenciar as vantagens do uso da solução que contemple o gerenciamento pelo lado da demanda de forma abrangente. Portanto, pretende envolver a sustentabilidade desde a produção da residência, com envelope construtivo eficiente energeticamente, até sua utilização ou operação, considerando as tecnologias de gestão advindas para as residências inteligentes. Cabe comentar que para esta proposta uma série de simplificações foram necessárias, tais como:

- Premissa de que as residências bioclimáticas consideradas sejam capazes de manter o conforto térmico com a estratégia indicada pela carta bioclimática para países quentes em desenvolvimento ([GIVONI, 1992](#)) para cada amostra de variáveis climáticas externas nos passos de tempo do escalonamento;
- Uso de direcionamento de painéis fotovoltaicos e coletores solares na melhor direção e inclinação possível;
- Suposição de que os ventiladores, climatizadores evaporativos, aquecedores e condicionadores de ar fossem dimensionados adequadamente para os ambientes da residência bioclimática considerando a carga térmica interna proveniente dos habitantes e eletrodomésticos;
- Consideração de que os fenômenos de atraso térmico e acúmulo de carga térmica no envelope construtivo da residência já estejam adequadamente considerados no projeto, haja vista que seriam necessárias simulações termo energéticas para melhores respostas frente a eles;
- Consideração de modelos simplificados para a geração fotovoltaica, para o sistema de aquecimento solar da água e nas restrições no uso da bateria residencial;

- Adoção de limiar de posse de eletrodomésticos de 15% dentre os pesquisados no PPH-2019 (ELETROBRÁS, 2019), considerando os horários de uso em acordo com os gráficos horários equivalentes de utilização;
- Cada eletrodoméstico foi considerado como de uso único dentro de um período do dia na aplicação em 96 passos;
- Preconização de que os inícios e finais de operação, duração de uso e tipificação dos eletrodomésticos estejam em acordo com as preferências dos moradores e sejam declaradas por eles nos gerenciadores residenciais de eletricidade;

As residências bioclimáticas tratam-se de edificações adequadamente concebidas ao clima local de cada cidade em estudo, ou seja, possibilitam a aplicação adequada das estratégias oriundas do lançamento das amostras climáticas na carta bioclimática adotada em cada passo de tempo para manter o conforto térmico em seu interior. Sendo assim, todas as estratégias comuns ao clima de cada cidade considerada deverão estar adequadamente equacionadas para uma vez em que sejam necessárias sejam acionadas ou aproveitadas no caso de estratégias de conforto térmico ou aquecimento solar passivo.

Estas simplificações delimitam o problema que possui uma temática interdisciplinar que envolve vertentes desde a psicologia e hábitos dos moradores, questões sociais e regionais e até mesmo questões de dimensionamentos das edificações que deixariam o escopo do trabalho inviável diante dessas vertentes.

1.2 Justificativa

Em várias partes do mundo as SGs já são realidade e atuam ampliando em grande escala os recursos e possibilidades para o uso racional da energia elétrica. A Itália constitui uma das referências a nível mundial, tanto que estudos de caso como o apresentado por Sanduleac et al. (2016) demonstram a existência de alta penetração de fontes renováveis. No referido trabalho são utilizadas técnicas de controle de tensão a partir de medidores inteligentes e sistema supervisorio de controle e aquisição de dados (SCADA, do inglês *Supervisory Control and Data Acquisition*).

Nos Estados Unidos existem também vários programas de DR, como um programa experimental de 4 meses de duração realizado no ano de 2009 retratado por Mohsenian-Rad e Leon-Garcia (2015), cuja realização se deu pela concessionária *Illinois Power Company*.

No Brasil, algumas iniciativas provenientes de projetos experimentais em SGs já foram efetuadas, tais como, nas cidades de Sete Lagoas-MG, Parintins-AM, Aparecida-SP, Domingos Martins-ES, Marechal Floriano-ES e Armação de Búzios-RJ, as quais foram

relatadas por [Moreira \(2014\)](#). Tais experimentos trazem à tona, tanto por parte das autoridades quanto das concessionárias de distribuição de energia elétrica, a preocupação com a temática que ostenta um futuro promissor.

A partir do anteriormente exposto é possível perceber a tendência de que a aplicação do conceito de SGs seja cada vez mais comum em escala mundial, possibilitando novas alternativas que visam mitigar problemas no sistema elétrico como um todo e que devem levar em consideração também que os consumidores em suas residências tenham um nível de conforto térmico adequado, sendo assim sustentável da forma mais abrangente possível.

Neste contexto, a Internet, os medidores inteligentes e os computadores serão essenciais para auxiliar ambos os lados (oferta e demanda por energia elétrica), sendo a DR uma estratégia promissora para um melhor aproveitamento dos recursos energéticos. Entretanto, um controle direto das cargas residenciais esbarra na questão da privacidade e liberdade dos moradores. Portanto, a estratégia mais adequada seria o uso de DR via variação do preço e escalonamento otimizado do consumo residencial, de tal forma que a partir da modelagem climática da edificação, em conjunto com o uso de dados climáticos locais se torna possível prever as condições necessárias de conforto a serem recomendadas ao consumidor final, ou seja, quais os eletrodomésticos e sistemas de climatização deverão ser ligados para garantir o conforto térmico e possibilitar um menor preço na fatura de energia elétrica em horizonte diário.

Vale a pena salientar que a pesquisa proposta aproveita a oportunidade da ausência de algoritmos que considerem o fato de que a climatização residencial no Brasil se dá predominantemente por meio de unidades individuais, sendo os mais variados possíveis, devido ao fato de que as variações climáticas muitas vezes exigem diferentes estratégias de climatização.

Entre os eletrodomésticos de climatização que são utilizados comumente no Brasil figuram o umidificador de ar, o resfriador evaporativo, o ar-condicionado, os ventiladores pessoais e de teto e os aquecedores. Outro agravante reside no fato da bibliografia previamente consultada indicar que os algoritmos de otimização, que levam em conta a manutenção do conforto térmico, utilizam apenas o condicionador de ar, que necessariamente não representa a estratégia energeticamente mais eficiente.

Também é importante salientar que o uso de energia solar fotovoltaica e térmica nas residências tem crescido ao longo dos anos de tal forma que o impacto dessa geração nas pequenas redes secundárias tem sido a redução da demanda dos transformadores e alimentadores. A partir disto, é interessante perceber que na ocorrência de calor concomitante à presença de radiação solar haverá geração solar fotovoltaica compensando, muitas vezes, a necessidade do uso do condicionador de ar.

A ferramenta computacional proposta poderá ser de grande utilidade frente a essas

oportunidades, uma vez que orienta o consumidor em seus acionamentos dos eletrodomésticos e sistemas de climatização, fazendo com que as famílias possam ter o conforto térmico resguardado ao mesmo tempo em que a fatura de energia elétrica tenha um valor reduzido mediante adoção da tarifa horária branca.

O valor da proposta reside no desenvolvimento de ferramenta acadêmica e sua avaliação para oportuna utilização nas residências. Para tanto, se faz necessária a subsequente análise de viabilidade no uso do instrumento proposto, comparando-o frente ao uso da tarifa convencional. A meta principal é que se faça um balanço otimizado entre a oferta e a demanda de energia elétrica, evitando investimentos no sistema elétrico que vão desde a troca de alimentadores e transformadores nas cidades até na redução de investimentos com a construção de novas usinas geradoras de energia elétrica.

1.3 Hipótese

Este trabalho tem como hipótese a viabilidade de um cenário de inteligência na gestão energética de unidades habitacionais frente a diferentes condições climáticas e sociais, considerando o aproveitamento de energia solar para geração de energia, aquecimento de água e ambiental participante do programa de resposta à demanda (DRP, do inglês *Demand Response Program*) do tipo TOU denominado de tarifa horária branca, ocorrendo a concomitante manutenção do conforto térmico. Destaca-se que tal manutenção deve incluir estratégias de diferentes custos energéticos, além da aplicação do ar-condicionado. A viabilidade desejada deverá levar em contrapartida cenários comparativos na tarifa convencional que englobam ou não o uso de recursos renováveis similares, excetuando-se o sistema inteligente de gestão e a bateria residencial.

1.4 Objetivos

A pesquisa proposta tem como objetivo principal construir e analisar a aplicação de escalonamento residencial de consumo de eletricidade na modalidade tarifária denominada tarifa horária branca considerando o aproveitamento de recursos renováveis, gestão de bateria e manutenção do conforto térmico. Para tal, considerar o uso da carta bioclimática atualizada para países em desenvolvimento com clima quente (GIVONI, 1992) como mecanismo de apoio a decisão para manter o conforto térmico no interior das residências, valer-se de modelos adequados da literatura, adaptando-os e desenvolvendo-os para emular o aproveitamento de energia solar e a gestão de bateria residencial em contraposição do cenário atual de aplicação da tarifa convencional. Para que este objetivo principal seja alcançado se faz necessário atingir alguns objetivos específicos, a saber:

- Implementar um conjunto de regras exatas, baseadas em inequações, para construir a curva de consumo basal imposta para a manutenção do conforto térmico para diferentes índices e métodos, as quais são dadas como entradas ao mecanismo de escalonamento do consumo de energia elétrica residencial;
- Desenvolver e adaptar o modelo matemático e algoritmo de otimização que possam, a partir da curva de consumo basal construída adicionando dados climáticos disponíveis e dados de posse e hábitos de consumo, propor um escalonamento dos eletrodomésticos, gestão de bateria residencial, aproveitamento de energia solar para geração fotovoltaica e aquecimento de água em residências nas diferentes zonas bioclimáticas brasileiras, visando a minimização da fatura diária de energia elétrica;
- Escolher uma cidade para cada zona bioclimática brasileira para aplicação do escalonamento do consumo de energia elétrica, distribuindo-as uniformemente nas regiões do Brasil, dando preferência às capitais e cidades com maiores populações;
- Obter dados de posse de eletrodomésticos, hábitos de consumo e características de ocupação para as unidades habitacionais em estudo que permitam a construção da curva de consumo de eletricidade para as residências dentro das cidades escolhidas no estudo;
- Selecionar adequadamente dias de aplicação do sistema proposto considerando diferentes condições climáticas e diferentes cenários de aproveitamento da energia solar fotovoltaica e térmica;
- Aplicar o sistema proposto em escala horária como aplicação preliminar aproximada da realidade para o sistema proposto;
- Aplicar o sistema proposto em escala de passos de tempo de 15 minutos para cidades com diferentes características climáticas e em diferentes regiões do Brasil, com uma cidade para cada zoneamento bioclimático;
- Analisar os ganhos dos consumidores na adoção do sistema proposto, bem como sua relação com a disponibilidade de energia solar nos dias de teste.

1.5 Organização do Trabalho

A tese foi organizada de modo a descrever sequencialmente os conceitos e as propostas de trabalho para a investigação realizada. Assim, o [Capítulo 1](#) introduziu o tema da pesquisa em conjunto com sua justificativa, hipótese e objetivos.

No [Capítulo 2](#) será destacada a breve fundamentação teórica que dá suporte à tese. Também se destina a uma investigação de estado da arte presente na literatura científica,

na qual a manutenção do conforto térmico no interior das edificações é considerada como aspecto central em diferentes tipos de DRPs.

No [Capítulo 3](#), a metodologia proposta será apresentada em detalhes, bem como as considerações para o dimensionamento dos sistemas envolvidos e a parametrização do mecanismo de escalonamento proposto. Na sequência, o [Capítulo 4](#) traz os resultados alcançados e as discussões em torno deles.

Por fim, no [Capítulo 5](#), pontuam-se as conclusões da tese, os trabalhos futuros e as produções científicas advindas dessa pesquisa.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

A seguir são apresentados conceitos gerais importantes para o desenvolvimento do conteúdo da tese, partindo das cidades inteligentes, área temática do presente trabalho, perpassando pela gestão energética e manutenção do conforto térmico nas edificações.

2.1 Cidades, Redes Elétricas e Edificações Inteligentes

De acordo com projeções apresentadas por [Leite e Awad \(2012\)](#), em 2030, a população urbana constituirá 60% da população do mundo e deverá atingir 75% em 2050, isto denota a importância e relevância de estudos científicos que considerem os problemas nas cidades e a busca pela sustentabilidade urbana. Ademais, tais autores pontuam que mais da metade do produto interno bruto dos países é proveniente de atividades econômicas urbanas. Revelam também que 75% dos resíduos são gerados nas cidades e ocorre simultaneamente o esgotamento dos recursos hídricos e o consumo exagerado de água potável. Assim, a sustentabilidade nas cidades consiste em oportunidades e desafios para o desenvolvimento de cada nação.

Desta forma, nota-se que a sustentabilidade urbana é assunto primordial e, segundo [Nalini e Neto \(2017\)](#), se desenrola em três grandes interfaces que possibilitam análises paralelas em vertentes ambiental, econômica e social. Também salientam que em determinadas aplicações, uma ou mais interfaces podem preponderar, mas é recomendável que as três se apresentem simultaneamente para considerar uma ação ou empreendimento como sustentável.

Para atender as necessidades de melhoria das relações dos habitantes entre si e com o meio ambiente, os avanços tecnológicos possibilitam vislumbrar aplicações na gestão e na vida cotidiana urbana, favorecendo o conceito de cidades inteligentes. De acordo com [Panhan, Mendes e Davis \(2016\)](#), a cidade inteligente amplia a interação social de forma

automática com serviços inteligentes disponíveis aos cidadãos.

Assim, o conceito de cidade inteligente abrange o urbanismo, a mobilidade urbana, a governança digital, segurança, suprimento de produtos para alimentação e com diversas outras finalidades, a gestão de recursos naturais, como a água e energia, e as edificações presentes na cidade. Dentro da gestão energética figuram-se as SGs, que atuam na porção da gestão de eletricidade no contexto urbano.

Ademais, alinhado ao conceito de SGs, as residências energeticamente inteligentes têm se tornado cada vez mais presentes na sociedade (BOLZANI, 2004) e, portanto, faz-se necessário o gerenciamento da energia pelo lado da demanda, conforme apresentado na sequência.

2.2 Gerenciamento da Energia pelo Lado da Demanda

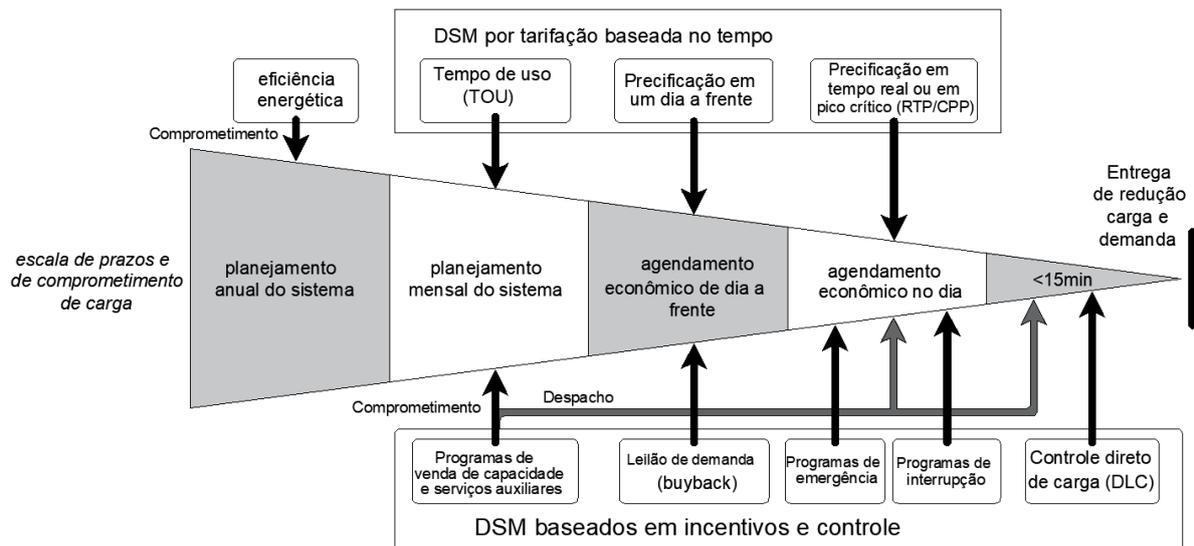
O DSM considera a eficiência energética como integrante de seu portfólio. Entretanto, as ações de DSM englobam além da escala de tempo, uma divisão que considera o tipo de ação por preço ou incentivo, bem como o meio de estabelecimento de cooperação entre consumidores e concessionária (as ações que podem ocorrer por comprometimento via contrato ou por controle). A concessionária pode estipular, por exemplo, que frente a um comprometimento do sistema, algumas cargas dos consumidores possam ser desligadas se assim permitido por controle direto de carga. Pode ainda solicitar que um determinado consumidor com gerador em sua instalação faça a conexão para o fornecimento suplementar ou vender uma redução em sua própria carga (denominada venda de capacidade).

Outra estratégia disponível consiste em precificar a energia de diferentes maneiras, induzindo a redução do consumo nos períodos de preço alto. A [Figura 1](#) demonstra como se dá as relações de DSM com o tempo e o tipo de cooperação segundo relatório do DOE (DOE, 2006).

No contexto da presente pesquisa, dar-se-á foco nas medidas de DSM denominadas DR, principalmente aquelas que consideram de alguma forma a manutenção do conforto térmico. Portanto, a eficiência energética se faz presente não apenas pelos eletrodomésticos, mas também no impacto que o clima ocasiona no uso dos equipamentos destinados à climatização.

A partir da crise energética de 2001, no Brasil, a eficiência energética tornou-se um assunto bastante difundido e, atualmente, não se restringe apenas às melhorias de eficiência dos eletrodomésticos. Assim, notam-se também melhorias quanto: ao envelope construtivo, ao aproveitamento direto de energia solar para aquecimento ambiental e de água e indireto por meio da geração fotovoltaica, à gestão de uso da energia, bem como às estratégias de ventilação e iluminação naturais. Neste sentido, pesquisas têm sido realizadas com

Figura 1 – Estrutura conceitual do DSM.



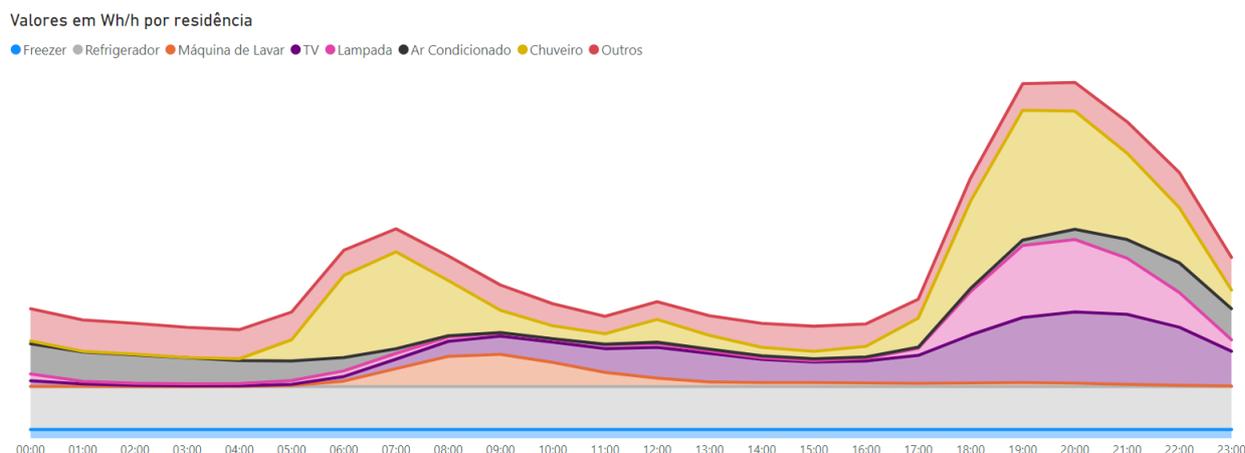
Fonte: Adaptado de DoE (2006).

o intuito de obter um melhor balanço energético das edificações. Para tanto, políticas voluntárias de certificação ambiental e eficiência energética para edifícios foram propostas, as quais, de acordo com Roméro e Reis (2012), possuem escopo que consideram cinco aspectos principais: local, água, materiais, ambiente interior e energia elétrica.

Adentrando-se na variedade de eletrodomésticos presentes nas residências se torna possível efetuar um levantamento do consumo diário delas. Neste sentido o Programa Nacional de Conservação de Energia e Eficiência Energética (PRFP), vinculado à Eletrobrás, publicou em 2019 um relatório de posse de dados de consumo de energia elétrica na classe de consumo residencial (ELETROBRÁS, 2019). Esses dados são provenientes de coletas efetuadas entre julho de 2018 a abril 2019, com aplicação de 18.775 questionários nos domicílios entrevistados de 166 municípios dos 26 estados do país e no Distrito Federal. Foram então caracterizados, em média, os eletrodomésticos mais utilizados e os horários do dia de maior uso, resultando em uma curva de demanda por energia elétrica para uma residência típica. Os dados do relatório produzido se encontram em plataforma online e se torna possível produzir diferentes gráficos das curvas de consumos e outras questões levantadas na referida pesquisa (ELETROBRÁS, 2021).

A seguir, na Figura 2, encontram-se as curvas de carga com um gráfico horário que demonstra a variação do consumo em Wh/h demonstrando simultaneamente a parcela de demanda e os respectivos eletrodomésticos responsáveis por cada uma delas na residência típica no Brasil.

Sendo o uso destes eletrodomésticos influenciado por condições climáticas e sociais, a preferência de estratégias como o uso do condicionador de ar pode ser diferente de acordo

Figura 2 – Curva de demanda de energia elétrica diária de uma residência típica no Brasil.

Fonte: Eletrobrás (2021).

com as regiões do país e mais especificamente nas cidades em estudo. Assim, em uma dada cidade, o uso do ventilador pode ser preponderante ao ar-condicionado, ou ainda, o contrário. Essa necessidade de atender particularidades regionais ou microrregionais pode preponderar na adoção ou não de DRPs voluntários.

No caso da substituição do chuveiro elétrico pode ser considerado o uso de um *boiler* para aquecimento e manutenção de água quente reservada para posterior utilização. Ademais, coletores solares térmicos poderão trabalhar em conjunto com o *boiler* para aquecimento da água ou até mesmo dispensar o uso do aquecimento elétrico quando o solar fornecer fonte de calor suficiente para tal.

Percebe-se, a partir do exposto, que existe uma influência direta do consumo energético com a manutenção do conforto térmico. Neste sentido, Yang, Yan e Lam (2014) propuseram uma revisão da literatura focada nesta relação direta entre o conforto térmico e o consumo energético. Portanto, a condição de um ambiente residencial confortável é de suma importância na aplicação dos programas de DR, uma vez que se torna indesejável que o conforto seja sacrificado para garantir o melhor uso da energia elétrica, pois neste caso a insatisfação dos moradores desequilibraria o tripé social da sustentabilidade. Assim, a aplicação de ações de DR deve necessariamente, para se dizer sustentável, dispensar cuidado com a condição de conforto com o ambiente térmico dos habitantes das edificações envolvidas.

2.3 Resposta à Demanda

Dentre as ações de DSM, destaca-se a DR, que propicia mudanças no formato da curva do consumo de eletricidade por meio de seus programas. Ao mesmo tempo que esses

programas promovem melhor aproveitamento dos recursos renováveis, ainda amortizam o uso de energias não renováveis e, portanto, reduzem a emissão de gases de efeito estufa (YAN et al., 2018). Ressalta-se ainda, como vantagens, a redução de custos de ampliação do sistema para as concessionárias e a disponibilização de menores tarifas de energia elétrica aos consumidores.

Conceitualmente, Zhou et al. (2014) definem a DR como respostas por mudança nos padrões de consumo de eletricidade dos usuários finais proveniente de variações temporais da tarifa energética. Entretanto, Gellings e Chamberlin (1988) já incluíam neste conceito as mudanças do uso de eletricidade pela manutenção da confiabilidade do suprimento energético, favorecendo a operação do sistema elétrico. Tanto Gellings e Chamberlin (1988) quanto Palensky e Dietrich (2011) classificam os DRPs como baseados em incentivos e em tarifação baseada no tempo.

Os programas baseados em incentivos financeiros são estabelecidos em eventos determinados diretamente por um provedor de energia elétrica ou intermediado por agregador de consumidores que negociam as reduções de demanda e seus valores durante estes eventos no mercado atacadista. Tal ação se dá pelo controle direto das cargas dos consumidores em DLC, ou mediante a solicitação ao consumidor por canal adequado de comunicação e o provedor ou agregador verificaria se tal redução foi implementada através dos medidores inteligentes, caso contrário o consumidor receberia multa e se o pedido fosse cumprido seria recompensado devidamente com remuneração oportuna. O DLC a nível de consumidores residenciais para a população em geral ainda não foi implantado no Brasil, mas nos Estados Unidos, Canadá e grande parte dos países europeus já são aplicados. Mais detalhes sobre estes tipos de DR e outros não tratados aqui podem ser encontrados em Siano (2014), com destaque para o setor residencial em Haider, See e Elmenreich (2016).

Conforme citado anteriormente, os programas de DR por tarifação baseados no tempo são elaborados para aproveitar o princípio econômico da elasticidade da demanda. Dessa forma, um aumento no preço de eletricidade em um horário de pico de consumo ocasionaria uma redução da demanda por eletricidade neste horário e por elasticidade cruzada tal consumo seria deslocado para outro de menor preço.

As três principais subcategorias deste tipo de programa são TOU, preço de pico crítico (CPP, *Critical Peak Price*) e precificação em tempo real (RTP, do inglês *Real Time Pricing*). O TOU pode apresentar blocos de preços temporais diários fora de pico, de pico e intermediários, em que as tarifas são pré-estabelecidas de forma que é classificado como estático, em contraposição ao CPP e RTP que são dinâmicos. O CPP emprega uma técnica de aumento tarifário emergencial no qual o consumidor é avisado com pouca antecedência, refletindo contingências nos sistemas elétricos. Por outro lado, no RTP é estabelecida uma variação de preço que pode ser horária ou em blocos de tempo menores e representam flutuação no preço de eletricidade comunicados no dia anterior ou muito próximo ao real,

muitas vezes por imposição da intermitência de fontes renováveis presentes em regiões específicas, principalmente as de matriz eólica. Para mais detalhes sobre programas de DR baseados em preços consultar a revisão de [Yan et al. \(2018\)](#) na qual estes programas são renomeados como dirigidos por preço (do inglês *price-driven*).

Sobre a experiência internacional com DR, em ([PATERAKIS; ERDING; CATALÃO, 2017](#)) é apresentada uma revisão bibliográfica que constata que programas baseados em TOU estão mais presentes na realidade concreta e, por serem estáticos, têm obtido mais sucesso em adesões em contraposição aos programas de preços dinâmicos. Ademais, os autores retratam muitos exemplos e o estado atual de aplicações, separando as análises na América do Norte, Europa, Ásia, Oceania, África e na América do Sul. Neste trabalho, o Brasil é destacado pelos autores no contexto sul-americano pelos seus programas de eficiência energética, um programa piloto com implantação de medidores inteligentes para DR pela AES Eletropaulo, bem como projeções da ANEEL que discutia, à época, mudanças para adoção de novas tarifações baseadas em preço. Os autores revelam que dentre os demais países da América do Sul, apenas Colômbia e Chile encontram-se em estágios iniciais de aplicações de DSM com regulações a serem desenvolvidas no mercado de energia elétrica.

Dentre relatórios públicos de programas e DR da Europa e América do Norte disponíveis na internet destaca-se o relatório elaborado por [Wong \(2015\)](#) que apresenta o desenvolvimento de programas de DR no setor residencial do Canadá e manifesta uma preocupação clara com a manutenção do conforto térmico, ressaltando que durante períodos de necessidade de desligamento do sistema de climatização residencial, a temperatura deve ser mantida em um intervalo aceitável para conforto do usuário. Neste mesmo documento, questões como o desempenho térmico da edificação são tratadas, retratando a capacitância térmica como instrumento de armazenamento de calor necessário para manutenção do conforto térmico. Nos demais documentos analisados, as expressões relacionadas a conforto são empregadas no sentido amplo que envolve o inconveniente de desligamento de carga ou da mudança de hábitos de consumo ([IEA, 2012a](#); [IEA, 2012b](#); [IEA, 2013](#); [IEA, 2014](#); [IEA, 2015](#); [IEA, 2016a](#); [IEA, 2016b](#); [IEA, 2017](#); [RTE, 2014](#); [CULLATHER, 2012](#); [PIETTE et al., 2009](#)).

Os EUA é o país dentre todos os pesquisados com maior disponibilização de documentos públicos. Entretanto, o conforto é colocado como uma responsabilidade do usuário e a perda do conforto é dada como uma renúncia em troca de benefícios financeiros para os participantes ([DOE, 2006](#)).

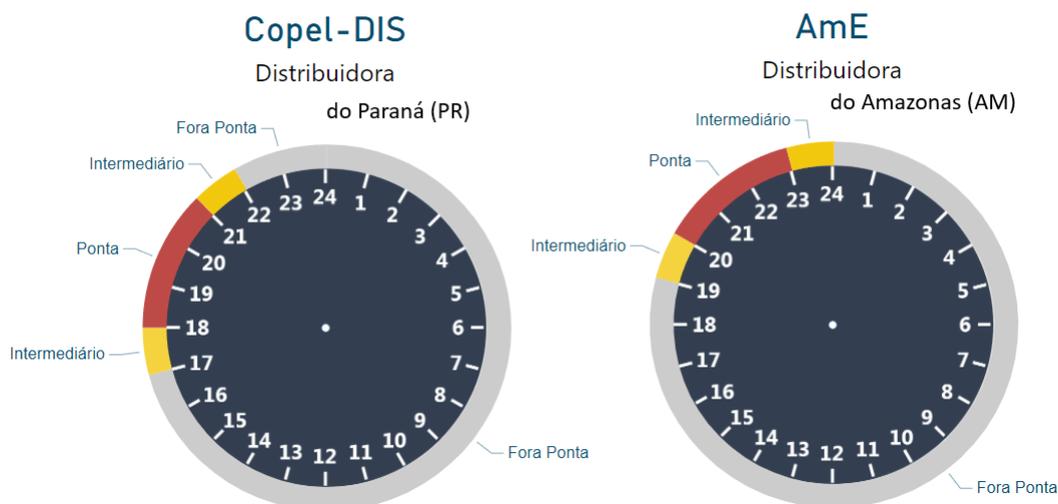
No âmbito geral de implantação de DR na Europa, o mercado vem se desenvolvendo nos últimos anos tanto que uma entidade associativa entre fabricantes que trabalham a favor do desenvolvimento das SGs, a *Smart Energy Demand Coalition* (SEDC), produz relatórios técnicos bienais sobre as condições de programas de DR no continente Europeu

(SEDC, 2015; SEDC, 2017).

No contexto brasileiro, a partir do ano de 2020, a tarifa horária branca foi disponibilizada com adesão voluntária a todos consumidores de baixa tensão residenciais, de pequenos comércios e indústrias conforme resolução normativa 733 (ANEEL, 2016), excetuando-se os consumidores de baixa renda. Este tipo de tarifação pode ser classificado como um DRP do tipo TOU, contendo três blocos tarifários, sendo um de ponta, outro fora de ponta e mais um intermediário, com os horários definidos pelas concessionárias e disponibilizados pela ANEEL em *websites* de postos tarifários (ANEEL, 2021a) e de preços, conforme *ranking* das tarifas (ANEEL, 2021b).

Para ilustrar as informações disponíveis nos endereços eletrônicos, a Figura 3 mostra os horários fora de ponta, ponta e intermediário no posto tarifário para o estado do Paraná (Copel-DIS, Companhia Paranaense de Energia) e para o estado do Amazonas (AmE, Amazonas Energia) (ANEEL, 2021a).

Figura 3 – Postos tarifários das concessionárias do estado do Paraná (PR) e do estado do Amazonas (AM).



Fonte: Adaptado de ANEEL (2021a).

Nota-se pela Figura 3 que o início da curva de tarifação atual da Copel-DIS (PR) se inicia as 17:00hs enquanto na AmE (AM) se inicia as 19:00hs.

No Brasil, a tarifa horária branca ainda possui baixa aderência, até mesmo por falta de informação por parte dos consumidores. A falta de engajamento dos participantes nos DRPs constitui barreira comportamental dentre as levantadas para a implantação desses programas (NOLAN; O'MALLEY, 2015). Isso é constatado em estudo de campo com aplicação de DR residencial no estado da Califórnia no final da década de 1990, visto que os usuários não responderam voluntariamente à variação do preço de eletricidade, no pico de consumo a demanda se mostrou praticamente inelástica e o engajamento foi

maior quanto menor as rendas das famílias, conforme apresentado em [Reiss Peter C. e White Matthew W. \(2002\)](#) e [Reiss e White \(2005\)](#). Portanto, particularmente neste caso, a camada social de menor renda foi a que melhor se engajou nos programas de DR e pode ter sacrificado seu conforto térmico neste processo, o que configura um evidente desalinhamento social.

Para contornar o problema social de adesão majoritária das classes de renda mais baixa, [Haider, See e Elmenreich \(2016\)](#) apresentaram uma estrutura tarifária TOU residencial denominada como esquema adaptativo de preços no nível de consumo (ACLPS, do inglês *Adaptive Consumption-level Pricing Scheme*) com a variação de curvas de preço TOU conforme o nível de demanda das residências.

A partir da permissão do consumidor (CA, do inglês *Consumption Allowance*) através do aumento de sua demanda, usando como referência uma banda invariável de preço (PIB, do inglês *Price Invariant Band*), com base na demanda atual medida pelo SM do consumidor em kW, o padrão tarifário poderia aumentar (CA+) ou, uma vez aumentado, poderia voltar a reduzir (CA-), trafegando nos diferentes níveis de tarifação. Essa abordagem favorece a justiça social, uma vez que, geralmente, os maiores consumidores de eletricidade possuem maior poder aquisitivo. A importância do atendimento dos aspectos sociais para DR são criticamente discutidos em [McKenna et al. \(2018\)](#), onde também é proposto um modelo estrutural para simulação adequada dos programas de DR para sua avaliação prévia.

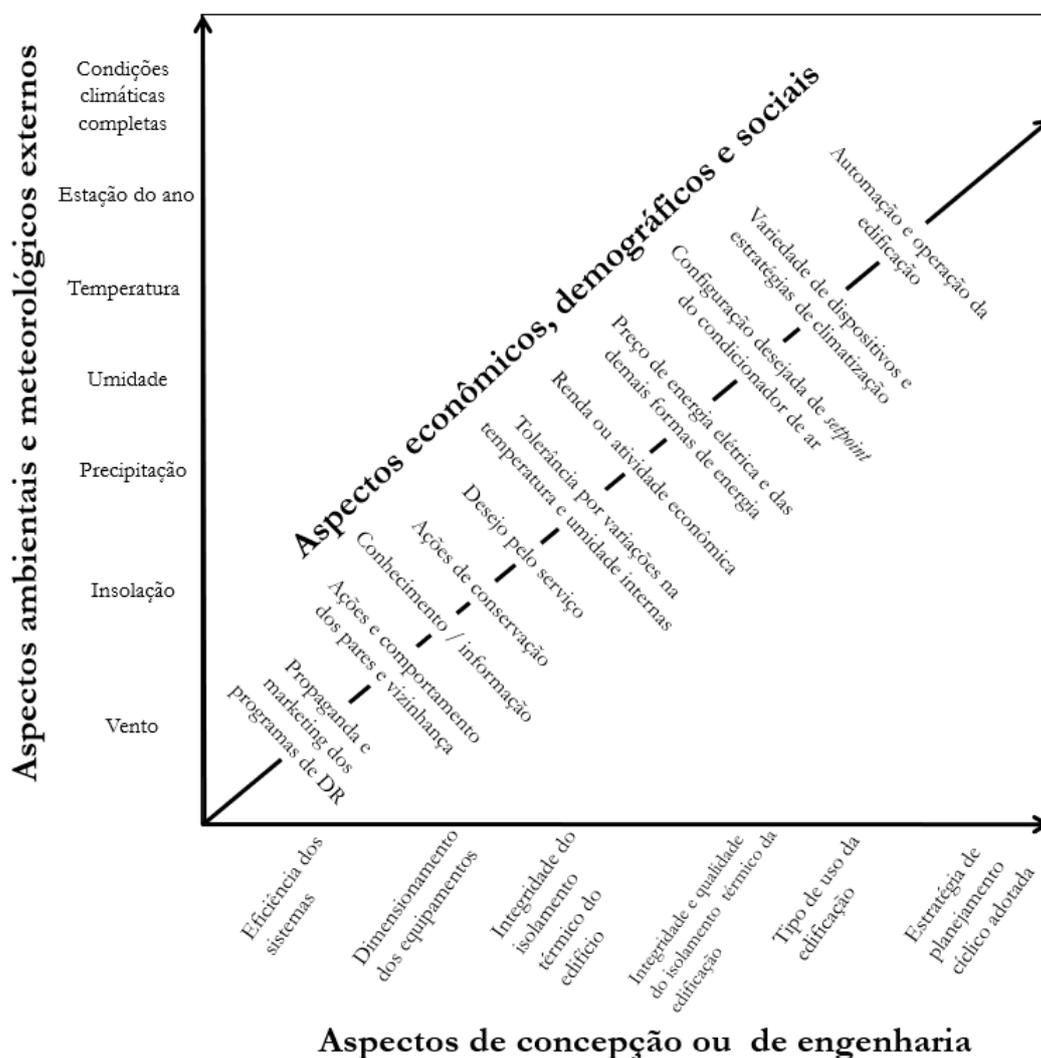
Embora a solução adotada por [Haider, See e Elmenreich \(2016\)](#) se mostre atraente, o problema da adesão nos DRPs não depende apenas da situação econômica, mas de aspectos que envolvem a tecnologia empregada no processo de concepção das edificações e seus sistemas de climatização com adequado dimensionamento. Por outro lado, envolve também aspectos sociais, econômicos e demográficos específicos e os ambientais e meteorológicos que podem ser menos ou mais impactantes na adesão aos programas de DR.

Baseando-se em ilustração similar construída para a adesão em programas do tipo DLC por [Gellings e Chamberlin \(1988\)](#), foi construída a [Figura 4](#) e adaptada ao sucesso de programas de DR em âmbito geral, para qualquer tipo de edificação, onde os aspectos anteriormente tratados são dispostos em eixos com o sentido ao maior impacto na adesão.

Cabe comentar que pela ilustração, no contexto para a realidade social considerada pelo autor, se torna evidente que os fatores que mais contribuem para a adesão são a estratégia de planejamento adotada, a automação e operação da edificação e as condições climáticas locais completas, de fato estes fatores são considerados na presente proposta, bem como as preferências dos usuários e os dispositivos de climatização e estratégias disponíveis em cada residência.

Buscando uma simulação aproximada da realidade concreta a tarifa horária branca

Figura 4 – Aspectos influentes na adesão dos consumidores a programas de DR.



Fonte: Adaptado de Gellings e Chamberlin (1988).

é a considerada para esta pesquisa, ponderando a manutenção do conforto térmico como uma condição *sine qua non*. Para auxiliar na manutenção da condição climática adequada será considerado aproveitamento de recursos naturais e tecnológicos acrescentados nas residências bioclimáticas em cada cidade de estudo.

2.4 Manutenção do Conforto Térmico em Edificações

O surgimento dos programas e ações de DR aliados à grande proporção energética dispendida para a climatização ambiental faz com que os equipamentos envolvidos estejam entre os principais elementos que contribuem para a adequação da curva de carga de eletricidade. Entretanto, surge um dilema conflitante entre as condições de conforto dos ocupantes e as necessidades elétricas. De acordo com a revisão da literatura de Aghniaey e

Lawrence (2018), a maior parte dos trabalhos prioriza a economia energética em detrimento do conforto térmico nos DRPs. Mesmo em programas implantados, quando os ocupantes das edificações necessitam manter o conforto térmico, esta condição se torna prioridade frente aos ganhos econômicos, conforme demonstra Thorsnes, Williams e Lawson (2012).

Assim, foi possível agregar as produções científicas de forma a identificar aquelas que conseguem relacionar DR, conforto térmico, recursos de otimização, recursos energéticos renováveis e que utilizam métrica adequada para quantificar os impactos na sustentabilidade.

No estudo de Vivian et al. (2020), o alto número de técnicas é proveniente a uma comparação de desempenho entre algoritmos de aprendizado de máquinas (ML, do inglês *Machine Learning*) para prever carga elétrica, dentre eles o algoritmo de floresta randômica (RF, do inglês *Random Forest*), redes neurais artificiais (RNAs), regressão por vetor de suporte (SVR, do inglês *Support Vector Regression*), regressão linear múltipla (MLR, do inglês *Multiple Linear Regression*) e um árvore de decisão. De forma análoga, Luo, Ranzi e Dong (2017) comparam o desempenho do algoritmo de agregação natural (NAA, *Natural Agregation Algorithm*) com algoritmo de otimização por enxame de partículas (PSO, do inglês *Particle Swarm Optmization*), algoritmo genético (GA, do inglês *Genetic Algorithm*), evolução diferencial (DE, do inglês *Differential Evolution*) e colônia artificial de abelhas (ABC, do inglês *Artificial Bee Colony*). Os autores também aplicam o método de Monte Carlo para gerar cargas termostaticamente controláveis e *k-Means* para agrupá-las.

Menos da metade dos trabalhos considera o uso de fontes renováveis de energia, embora possam desempenhar um papel compensatório interessante para auxiliar a manutenção do conforto térmico em eventos de DR. A fonte renovável mais aplicada foi a energia fotovoltaica, sendo mais que três vezes empregada que a eólica. Essa tecnologia se torna crescentemente acessível e, em conjunto com o uso de sistema de armazenamento elétrico (ESS, *Energy Storage System*), pode ser valiosa para soluções de DR, em que o armazenamento compensaria a intermitência natural deste tipo de fonte. A combinação com ESS é promissora de tal forma que a maior parte dos trabalhos com energia fotovoltaica a considera, totalizando 11 trabalhos (BIANCHINI et al., 2019; BIYIK; KAHRAMAN, 2019; JAIN et al., 2018; JIN et al., 2017; KORKAS et al., 2016; LI; WEN; MALKAWI, 2016; LUO et al., 2019; RODRIGUEZ et al., 2019; STAVRAKAS; FLAMOS, 2020; WANG et al., 2019).

A energia eólica foi pouco empregada (ANWAR et al., 2019; KORKAS et al., 2016; POMBEIRO; MACHADO; SILVA, 2017; WANG et al., 2019; YANG; ZHANG; ZHOU, 2017) e o aquecimento solar da água também. Apenas nos estudos de Nguyen, Nguyen e Le (2015) que aplicaram para um sistema de climatização específico que é assistido por energia solar térmica e Causone et al. (2019) que considera a aplicação conjunta do aproveitamento solar em uma edificação modelo.

O escalonamento do consumo ou controle de outros eletrodomésticos ou equipamentos que possam ter seu consumo deslocado, tais quais máquinas de lavar roupas, louças ou secadoras foi um recurso aplicado em apenas 7 estudos (ANVARI-MOGHADDAM; MONSEF; RAHIMI-KIAN, 2015; JIN et al., 2017; LUO et al., 2019; NGUYEN; NGUYEN; LE, 2015; POMBEIRO; MACHADO; SILVA, 2017; SAFDARIAN et al., 2016; WANG et al., 2019). Tal deslocamento de consumo poderia ser valioso se adequadamente antecipado ou postergado para que o conforto térmico fosse mantido.

Devido à integração de recursos naturais na modelagem de problemas de DR, ainda buscou-se analisar os estudos que fazem uso de algum indicador de sustentabilidade para avaliar seus resultados. Apesar de nenhum indicador de sustentabilidade ter sido formalmente declarado nos estudos, foram encontradas apenas 6 publicações com análises equivalentes. Nos trabalhos de Causone et al. (2019), Rodríguez et al. (2018), Rodríguez et al. (2019) são apresentados balanços entre a energia absorvida da rede e a aproveitada por instalação fotovoltaica. Além deste balanço, o sistema residencial de gerenciamento energético (HEMS, do inglês *Home Energy Management System*) apresentado por Jin et al. (2017) inclui uma penalização por emissão de CO₂ na modelagem do problema de otimização. Por outro lado, Pajot et al. (2018) consideram os impactos na redução de emissão de CO₂ devido à redução de demanda no horário de pico, enquanto utilizam o balanço diário e incluem as variações no uso de armazenamento térmico, armazenamento elétrico e energia não-renovável proveniente de gás. Menciona-se ainda que os indicadores de sustentabilidade podem ser agregados à modelagem de problemas multiobjetivo, conforme Shidhani, Ioannou e Falcone (2020) para o planejamento integrado de sistema de potência.

2.4.1 Índices de Conforto Térmico

Para que o conforto térmico seja mantido nas edificações é fundamental um instrumento métrico das condições que o envolvam. Conforme Carlucci (2013) vários índices relacionados a condições de satisfação térmica vêm sendo proposto ao longo do tempo pela comunidade científica, os quais consideram aspectos fisiológicos, psicológicos, médicos, climatológicos e de engenharia.

Cabe comentar que os mais de 75 índices propostos podem ter sido desenvolvidos em diferentes condições ambientais, considerando diferentes parâmetros de usuários com diferentes idades e sexo. Como o conforto térmico varia com questões culturais e de aclimação, nem sempre um mesmo índice será adequado para todas as pessoas. Frota (2006) também apresentam alguns dos principais índices de conforto térmico que utilizam como ferramenta dados climáticos internos e externos para análise nas edificações.

Fica evidente, a partir dos recursos naturais e de outras estratégias de climatização existentes, que o ar-condicionado não deverá ser a única estratégia para a manutenção do

conforto térmico, haja vista que ventiladores, climatizadores evaporativos, umidificadores e aquecedores também poderão atuar nesta tarefa. Além de que tanto a ventilação natural ou aquecimento solar passivo conseguirão também proporcionar o conforto, dependendo da condição climática específica, sem custo de energia elétrica.

Diversas divisões e agrupamentos são propostos para as métricas de conforto térmico. Destaca-se no contexto deste trabalho quatro principais abordagens: analítica, adaptativa, prática-experimental e bioclimática.

A primeira abordagem é proveniente dos estudos analíticos de Fanger (1970). Ele considerou pessoas de diferentes nacionalidades em câmaras climatizadas. O índice proposto engloba as condições ambientais, a vestimenta e a taxa metabólica dos indivíduos. Esta abordagem tem grande relevância acadêmica, principalmente para edificações mecanicamente climatizadas. Oriundos desse estudo, podem ser destacados dois índices, a saber: voto médio predito (PMV, do inglês *Predicted Mean Vote*) e percentual predito de insatisfeitos (PPD, do inglês *Predicted Percentage of Dissatisfied*) (ISO, 2005; ASHRAE, 2017; CEN, 2007). Outro índice analítico consolidado na literatura é a Temperatura Efetiva Padrão (SET, do inglês *Standard Effective Temperature*), relacionada com a sensação de desconforto térmico (GAGGE; FOBELETS; BERGLUND, 1986).

A abordagem adaptativa, conforme Nicol e Humphreys (2002), considera as reações dos ocupantes como pressuposto fundamental o princípio adaptativo de que se ocorre uma mudança capaz de produzir algum tipo de desconforto, as pessoas reagem de maneira a buscarem seu reestabelecimento. Ela é usualmente indicada para ambientes naturalmente ventilados, onde os usuários possuem controle sobre as condições ambientais, nomeadamente a abertura e o fechamento das janelas. As diretrizes para esta abordagem também se encontram em normas internacionais com modelos diferentes na norma europeia (CEN, 2007) e na americana (ASHRAE, 2017) (oriunda dos estudos de Brager e Dear (2001)). Indicadores derivados dos supracitados também se destacam, como: (i) voto médio predito adaptativo (aPMV, do inglês *Adaptive Predicted Mean Vote*) que considera um fator adaptativo (λ) que representa a integração teórica entre os aspectos psicológicos, comportamentais e fisiológicos (YAO; LI; LIU, 2009); (ii) *ASHRAE Likelihood of Dissatisfied* (ALD) proposto pela associação americana de engenheiros de aquecimento, refrigeração e ar condicionado (ASHRAE, do inglês *American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers*) que representa a probabilidade de insatisfeitos e se baseia na aplicação de regressão logística (CARLUCCI, 2013) sobre o banco de dados ASHRAE RP-884 (DEAR; BRAGER, 1998).

A abordagem prática-experimental se baseia na resposta direta dos ocupantes, com as quais é efetuada análise estatística cruzada com dados climáticos medidos para avaliar as condições de conforto (DEAR; BRAGER, 1998). A sensação térmica dos ocupantes pode ser avaliada por meio do voto de sensação térmica (TSV, do inglês *Thermal Sensation*

Vote), que segue a escala do PMV ou o voto médio atual (AMV, do inglês *Actual Mean Vote*) que considera os limites da escala como “muito frio” e “muito quente” e é mais adequado para climas tropicais, conforme destacado em [Enescu \(2017\)](#). Também há o voto de satisfação binário que considera a satisfação ou insatisfação, ou ainda a sensação positiva ou negativa sobre as condições do ambiente térmico interno.

A última abordagem, denominada bioclimática, é derivada da proposta de [Olgyay \(1963\)](#) em que o microclima é relacionado ao ambiente construído. [Givoni \(1969\)](#) avançou na proposta utilizando divisões na carta psicrométrica, que passaram a ser aplicadas considerando estratégias ativas e passivas delimitadas graficamente em carta psicrométrica atualizada para países de clima quente e em desenvolvimento ([GIVONI, 1992](#)). Embora mais relacionada ao projeto das edificações, pode ser considerado um instrumento de avaliação de conforto térmico, uma vez que, para condições climáticas externas, propõe respostas de estratégias a estas demandas que se adequadamente implementadas garantem um melhor aproveitamento dos recursos naturais.

Sobre esta última abordagem uma extensa revisão da literatura contendo várias aplicações científicas são encontradas em [Manzano-Agugliaro et al. \(2015\)](#), onde destacam-se o Brasil e a Itália dentre os países que mais aplicam a arquitetura bioclimática, sendo assim condizente com a proposta da presente tese. Vale destacar que a proposta da presente tese não é aprofundar sobre as técnicas construtivas e de projeto da arquitetura bioclimática e quais são elas para cada cidade, mas considerá-la como uma ferramenta corretamente implementada nas residências em estudo. Sendo assim, cada amostra climática lançada na carta bioclimática, para cada passo de tempo, teria o conforto térmico mantido mediante o uso da estratégia imposta pela carta, mesmo que para isto considere também o uso oportuno de automação residencial para, por exemplo, abrir a janela efetuando a troca de ar com o exterior ou abrir cortinas para que o sol exerça aquecimento solar passivo.

Na primeira abordagem e na maior parte da segunda são necessários dados climáticos no interior das edificações que podem ser obtidos por meio de medições ou simulações termo energéticas. Já na terceira abordagem, além das medições, se torna necessária aplicação de questionários. Por outro lado, na quarta e última abordagem apresentada apenas dados climáticos externos são necessários, entretanto tanto o envelope construtivo como os sistemas de climatização devem estar adequadamente projetados de maneira bioclimática. Assim, para a elaboração de uma residência que atenda as premissas aqui consideradas, a simulação computacional da envolvente do edifício se torna uma ferramenta importante.

As simulações termo energéticas das edificações reduzem custos para análises de longo prazo e promovem controle para a geração de dados relacionados ao clima local, sendo altamente impactantes se forem consideradas muito cedo no processo projetual ([HENSEN; LAMBERTS, 2012](#)). Para a obtenção das variáveis necessárias ao cálculo de

Quadro 1 – Sumário dos índices de conforto térmico.

Nome do índice de avaliação de conforto térmico	Variáveis de cálculo	Valor de saída	Referências
Voto médio predito (PMV)	$PMV = f(t_a, t_{rm}, U_r, v, I_{cl}, M)$	Valor entre -3 e +3	(Fanger, 1970; ISO, 2005;
Percentual de Pessoas insatisfeitas (PPD)	$PPD = f(PMV)$	Percentual entre 5 a 100 (%)	CEN, 2007; ASHRAE, 2017)
Temperatura efetiva padrão (SET)	$PMV = f(t_a, t_{rm}, U_r, v, I_{cl}, M)$	Valor de temperatura (°C)	(GAGGE; FOBELETS; BERGLUNG, 1986; ASHRAE, 2017;)
Temperatura adaptativo de conforto conforme CEN/EN	$t_{adpt_{CEN/EN}} = f(t_{mep})$	Valor de temperatura (°C)	(NICOL; HUMPHREYS, 2002; CEN, 2007)
Temperatura adaptativo de conforto conforme ASHRAE	$t_{adpt_{ASHRAE}} = f(t_{mme})$	Valor de temperatura (°C)	(NICOL; HUMPHREYS, 2002; CEN, 2007)
Voto médio predito adaptativo (aPMV)	$aPMV = f(t_a, t_{rm}, U_r, v, I_{cl}, M, \lambda)$	Valor entre -3 e +3	(YAO; LI; LIU, 2009)
Probabilidade de insatisfeitos da ASHRAE (ALD)	$ALD = f(t_a, t_{adpt_{ASHRAE}})$	Valor entre 0,07 e 1	(CARLUCCI, 2013)

índices de conforto térmico, faz-se necessário conhecer não apenas os dados dos materiais e as métricas das edificações, mas também a ocupação dos usuários no interior delas, uma vez que estes acionam eletrodomésticos emissores de carga térmica além dos próprios serem também emissores de calor.

Para o cálculo dos índices de conforto destacados, as variáveis foram sumarizadas no [Quadro 1](#) que foi adaptado de [Schweiker \(2016\)](#).

Para esclarecer as variáveis do [Quadro 1](#), foi construído o [Quadro 2](#) com as legendas das variáveis de cálculo, suas especificações ou significados e a unidade de cada variável.

Outra ferramenta de análise que difere da simulação consiste na aplicação da carta bioclimática plotada no diagrama psicrométrico, oriunda da proposta inicial de [Givoni \(1969\)](#). Posteriormente Watson e Labs, aproveitando a metodologia de Givoni, confeccionaram uma nova carta bioclimática acrescentando o incremento ou bloqueio de certas estratégias de acordo com a estação do ano, obtendo 17 subzonas por meio de associação de necessidades de controle climático já delimitados anteriormente ([WATSON, 1983](#)). Além disso, os autores passaram a efetuar análise das variáveis para as 8.760 horas no ano para determinar quais são as estratégias de climatização durante este período, que

Quadro 2 – Variáveis dos índices de conforto térmico do [Quadro 1](#).

Variável	Especificação	Unidade
t_a	Temperatura de bulbo seco interna do ar	°C
t_{rm}	Temperatura radiante média	°C
U_r	Umidade relativa interna	%
v	Velocidade do ar interna	m/s
I_{cl}	Nível de isolamento de vestimenta	clo
M	Taxa de metabolismo	met
t_{mep}	Temperatura média externa predominante	°C
t_{mme}	Temperatura média mensal externa	°C
λ	Coefficiente adaptativo	adimensional

pode ser o ano climático de referência (TRY, do inglês *Test Reference Year*) ou considerar dados climáticos locais.

Posteriormente a carta de Givoni teve sua metodologia atualizada para países em desenvolvimento de clima quente, onde os limites máximos de conforto foram expandidos devido a aclimatação dos moradores nestes países (GIVONI, 1992). Então, acrescentando parte da metodologia de Mahoney, Koenigsberger e Evans (1971), Roriz, Ghisi e Lamberts (1999b) propuseram uma nova carta adaptada para o Brasil que também foi apresentada internacionalmente (RORIZ; GHISI; LAMBERTS, 1999a). Posteriormente, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) aproveitou a carta de Roriz, Ghisi e Lamberts (1999b), a qual foi incorporada na NBR 15220 (ABNT, 2005), que estabelece adequações construtivas para projetos bioclimáticos em habitações de interesse social nas diferentes zonas climáticas do Brasil.

A carta bioclimática de Givoni (1992) é muito presente nas análises bioclimáticas no Brasil, até mais que a carta proposta na NBR 15220 (ABNT, 2005), tanto que a primeira carta é a efetivamente adotada pelo software *AnalysisBio* (ONO, 2010). Sendo assim, a carta de Givoni (1992) para países de clima quente em desenvolvimento foi a considerada por este trabalho. Ademais, esta adoção permite que a metodologia possa ser replicada para outros países do mundo, desde que contemplem as premissas climáticas e de desenvolvimento social. Entretanto, cabe destacar que o zoneamento bioclimático brasileiro considerado na presente proposta permaneceu conforme o adotado na NBR 15220 (ABNT, 2005).

2.4.2 Índices de Conforto Térmico Aplicados em Programas de Resposta à Demanda

O índice PMV/PPD é o mais aplicado nos estudos analisados, entretanto estes índices são mais adequados ao uso do condicionamento mecânico do ar, não abrangendo

condições ambientais favoráveis para a manutenção do conforto com ventilação natural, ventilação mecânica ou ainda o resfriamento evaporativo.

Além dos índices de avaliação de conforto mencionados no [Quadro 1](#), alguns autores propõem novos índices de conforto. [Good e Mancarella \(2019\)](#) elaboram um índice que representa o desconforto em cada hora, considerando a ocupação e a diferença entre a temperatura atual a temperatura pré-definida pelos ocupantes. Uma modificação do PMV/PPD é proposta por [Alimohammadisagvand et al. \(2017\)](#), a qual considera a variação de parâmetros de níveis de vestimenta e atividade, bem como a velocidade do ar. A aplicação de um PPD ponderado (tradução livre de *Weighted PPD* (WPPD)) é utilizada em [Meinrenken e Mehmani \(2019\)](#), onde uma proporção entre os ocupantes atuais e o limite máximo de ocupantes irá ponderar o PPD. Dessa forma, quanto menor a proporção de ocupantes em relação à capacidade de ocupação, menor será o fator de ponderação (entre 0 e 1) a ser multiplicado pelo PPD obtido.

Um índice de conforto para eventos rápidos de DR, denominado como valor de sacrifício acumulado (CSV, do inglês *Cumulated Sacrifice Value*), é proposto por [JIN et al., 2019](#)). Este valor corresponde à integral de uma área que considera o desvio da temperatura em relação à temperatura de *setpoint* durante um determinado tempo em um sistema de *chillers*. A estratégia proposta para o controle do sistema se resume em desligar algumas máquinas para resfriamento e aplicar incrementos uniformes nas temperaturas de ajuste durante o evento de DR. Ao final do evento, os *chillers* são religados e o ajuste de temperatura retorna gradativamente ao valor anterior ajustado.

A aplicação simultânea de três índices para avaliação do conforto térmico foi encontrada em apenas dois trabalhos de pesquisa de campo relacionadas ao conforto dos usuários, avaliando suas metodologias com 1336 ([AGHNIAEY; LAWRENCE, 2018](#)) e 56 pessoas ([ZHANG; DEAR; CANDIDO, 2016](#)), respectivamente. [Zhang, Dear e Candido \(2016\)](#) ainda avançam ao simular transitórios térmicos decorrentes de eventos de DLC com diferentes estratégias de variação de temperatura no ambiente controlado, considerando taxas de variação maiores que as permitidas pela norma ASHRAE 55-2013 ([ASHRAE, 2013](#)). Dessa forma, os autores demonstram que as taxas permitidas são muito conservadoras e poderiam ser aumentadas no contexto de DRPs. Nesse âmbito, há uma lacuna de pesquisa que indica a clara necessidade de estudos experimentais para definir melhor a aceitação dos ocupantes e avaliar o real potencial da aplicação de DR em sistemas HVAC. Ambos os estudos mencionados foram realizados em ambientes universitários, neste sentido, posteriormente, [Zhang e Dear \(2017\)](#) avaliam os impactos cognitivos em estudantes universitários frente a eventos de DR.

2.5 Sustentabilidade e Uso de Recursos Energéticos em Edificações

As ações ou programas de DSM e mais especificamente de DR objetivam o melhor aproveitamento das fontes renováveis de energia, postergando a exploração de recursos naturais e consequente degradação ambiental, além de adiar investimentos financeiros em toda a cadeia de energia elétrica. No lado dos consumidores, quando estes permitem o deslocamento de seus consumos de horários de alto preço tarifário para um preço menor ou permitirem o controle remoto de suas cargas, também são beneficiados economicamente. Entretanto, o sacrifício do conforto térmico dos consumidores nestes programas representa um desbalanço de satisfação social e, por isso, se torna essencial lançar mão de recursos para sua manutenção. Dessa forma, o aproveitamento de recursos energéticos se torna interessante, pois buscará uma solução que atenda da melhor forma possível as necessidades das vertentes ambiental, econômica e social, buscando minimização da fatura diária de eletricidade.

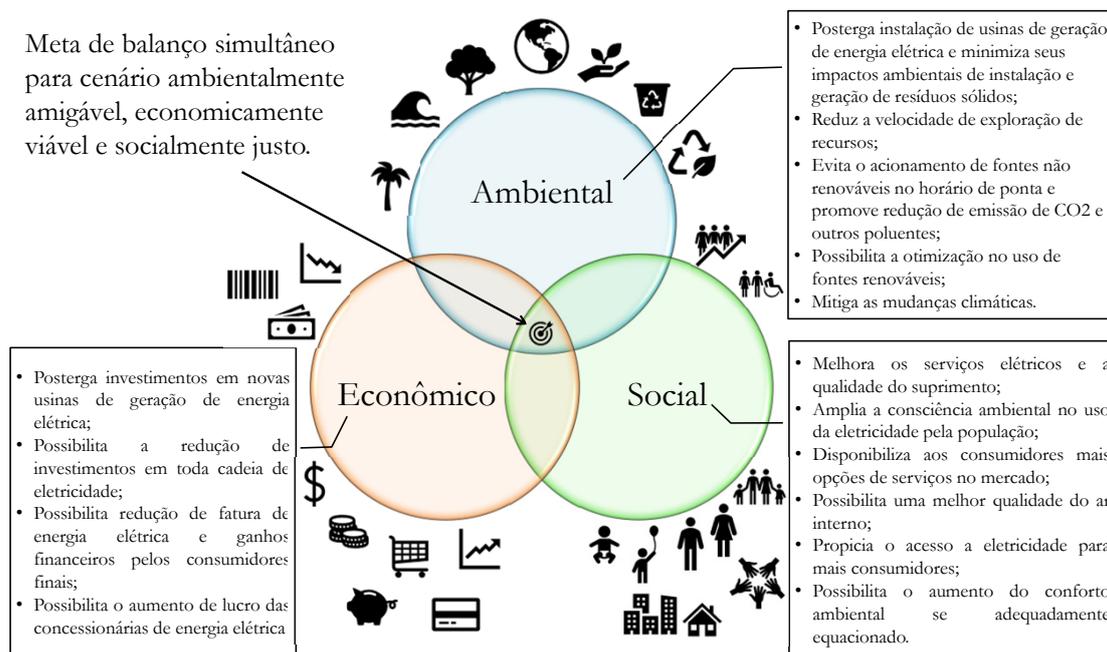
Um dos desafios fundamentais para a elaboração de um programa de DR ideal é estabelecer uma estratégia *ganha-ganha* entre o consumidor e a concessionária (HAIDER; SEE; ELMENREICH, 2016), incluindo simultaneamente aspectos ambientais, econômicos e sociais. Desta forma, a Figura 5 ilustra a intersecção dos três aspectos da sustentabilidade e ao mesmo tempo sumariza os benefícios inerentes a cada um desses aspectos na aplicação da DR, aproveitando em partes os benefícios das SGs, conforme destacado por (GELLINGS, 2009).

Nesta tese, o aproveitamento da energia solar ocupa um lugar de destaque, uma vez que se contempla na aplicação proposta simultaneamente três vertentes de aproveitamento desta fonte de energia nas residências consideradas neste estudo, a saber: aquecimento solar passivo, sistema de aquecimento de água e geração de energia elétrica.

2.5.1 Aquecimento Solar Passivo

O aquecimento solar passivo consiste em diversidade de estratégias passíveis de aplicação nas edificações, tratando-se de climas predominantemente frios. De acordo com Heywood (2015), janelas voltadas para a direção de maior radiação solar no inverno podem fornecer fonte suficiente de calor, enquanto estratégias como estufas e massa acumuladora podem ser aplicadas dependendo da severidade do frio nessa estação e no local considerado. Tratando-se do clima tropical, Corbella e Corner (2011) recomendam que os ganhos de calor pela radiação solar devem ser controlados, em que cortinas, brises e venezianas podem ser utilizadas para que, durante os períodos frios, a radiação possa auxiliar na climatização

Figura 5 – Sumário de benefícios das dimensões da sustentabilidade em programas de DR.



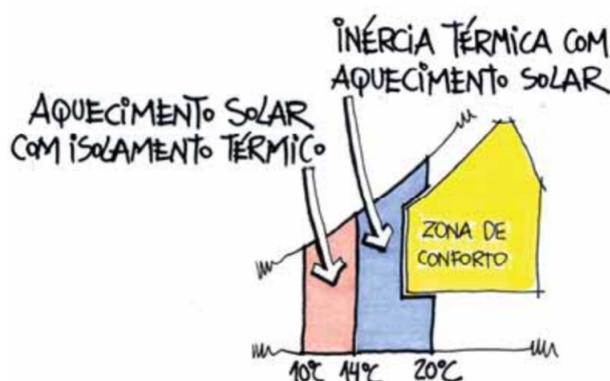
Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

e nos períodos de calor os espaços interiores possam ser protegidos da radiação solar.

Nesse contexto, o projeto arquitetônico deve considerar o clima local para determinar como o aquecimento solar passivo pode contribuir à manutenção do conforto. Podem ser consideradas aberturas zenitais ou outros dispositivos, quando assim conveniente. Com base na proporção das horas nestas zonas específicas na carta bioclimática, conforme [Figura 6](#), na região de aquecimento solar passivo e inércia térmica com aquecimento solar, [Lamberts, Dutra e Pereira \(2013\)](#) recomendam isolamento térmico para evitar a perda de calor interno, superfícies envidraçadas orientadas para o sol, uso de estufas, entre outras encontradas na literatura. O projetista da edificação deverá dimensionar as aberturas e fechamentos para favorecer tal estratégia quando ela é fundamental para uma dada localidade.

[Allen \(2011\)](#) ressalta que a radiação solar, para climas frios, constitui recurso suplementar bem-vindo ao conteúdo térmico das edificações, uma vez que pode ser absorvida pelas paredes e aberturas. Uma estratégia mais produtiva, recomendada pelo autor, consiste em isolar as superfícies que estarão predominantemente voltadas ao sol no verão e naquelas voltados ao sol no inverno utilizar grandes janelas para captar o calor oriundo do sol, fechando-as com persianas isolantes ou cortinas e persianas pesadas quando o sol não estiver presente. Sendo assim, a radiação pode ser aproveitada quando disponível e as aberturas podem ser isoladas quando assim necessário.

Figura 6 – Regiões de aquecimento solar na carta bioclimática atualizada de Givoni (1992).



Fonte: Lamberts, Dutra e Pereira (2013).

Por simplicidade, neste trabalho foi considerado que, quando uma amostra climática está nas regiões de aquecimento solar ou aquecimento solar passivo, conforme ilustrado em [Figura 6](#), e simultaneamente houver disponibilidade de radiação solar, nenhum equipamento ativo de climatização deverá ser ligado, ou seja, a energia proveniente do sol será capaz aquecer adequadamente a residência.

2.5.2 Sistema de Aquecimento de Água

Segundo [Luiz \(2013\)](#), a aplicação de sistemas de aquecimento de água utilizando coletores planos é uma das aplicações térmicas mais simplórias de energia solar e envolve valores entre 70% a 80% de todas as aplicações de aproveitamento da energia solar existentes no mundo.

Os sistemas de aquecimento de água possuem diversas características que envolvem, segundo [Miyazato \(2016\)](#), os tipos de coletores aplicados. A circulação de água no sistema pode ocorrer por meio de bombeamento elétrico ou pelo efeito da convecção da água e gravidade ([LUIZ, 2013](#)). Além disso, [Miyazato \(2016\)](#) classifica os sistemas como: convencional quando o dispositivo de armazenamento está separado do coletor a uma distância determinada; acoplado quando o reservatório e os coletores possuem uma estrutura de suporte comum; ou integrada quando as funções de coleta e armazenamento de energia solar são utilizadas dentro do mesmo dispositivo. Este último sistema é menos comum e geralmente não conserva a água quente por tempo prolongado.

Conforme [Sowmy e Ara \(2021\)](#), o sistema por aquecimento solar da água por termossifão tem seu abastecimento pela caixa de água fria, com circulação dada nos coletores solares para o reservatório e o fluxo de água fria advém da parte inferior do reservatório térmico (*boiler*) aos coletores solares. Cabe comentar que o reservatório térmico possui resistor elétrico como sistema de retaguarda quando a radiação solar não

é disponível, entretanto o *boiler* pode ser utilizado mesmo sem coletores solares como sistema centralizado de aquecimento de água na residência. No Brasil, tem ocorrido a criação de leis de incentivos ao uso desse sistema para residências nas esferas municipais, estaduais e federal.

2.5.3 Geração Fotovoltaica

Nos centros urbanos, a instalação de um sistema autônomo de geração fotovoltaico isolado da rede elétrica é inviável, haja vista que há a disponibilidade de conexão à rede, dispensando assim um sistema de baterias. Nakano, Pacheco e Grimoni (2021) classificam os sistemas fotovoltaicos como conectados à rede ou autônomos. A partir disso, classifica os sistemas como fonte única, nos quais apenas a geração fotovoltaica é considerada; ou híbrida quando há a presença de outra fonte de geração ou sistema de *backup*.

Segundo Balfour, Shaw e Nash (2016), a maioria dos sistemas conectados à rede não possui baterias devido ao alto preço delas e que a conexão à rede pode fornecer energia elétrica adicional necessária na ausência de radiação solar para geração fotovoltaica. Entretanto, tratando-se de aplicações de preço variável ao longo do dia, a bateria passa a ser uma alternativa para fornecer energia nos períodos de alto preço.

Além de todas estas facilidades e destaques da energia fotovoltaica em sua modalidade atual, diversos estudos conduzidos a nível de laboratório tem produzido células fotovoltaicas que ocasionam menor poluição ambiental e podem ser aplicadas nas paredes das edificações com eficiência aceitável (MARIOTTI et al., 2020).

Para o dimensionamento de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica, Villalva e Gazoli (2012) estabelece opcionalmente três critérios. O primeiro baseado no consumo mensal médio de eletricidade (kWh/mês) a partir de dados obtidos da conta de eletricidade, o segundo leva em conta o espaço disponível para instalar as placas, enquanto o terceiro é fundamentado na disponibilidade de investimento do consumidor.

2.6 Escalonamento do Consumo de Energia Elétrica

A otimização do uso energético nas edificações é um ramo de grande relevância, tanto que diversas revisões da literatura foram produzidas nesse sentido. Shaikh et al. (2014) considera estudos que empregam controle, otimização e o gerenciamento de conforto em um espectro geral para edificações inteligentes e sustentáveis. De forma similar, outra revisão trata da otimização aplicada não apenas no controle, mas também no projeto de edifícios de energia quase zero (nZEB do inglês *Nearly Zero Energy Buildings*) (LU; WANG; SHAN, 2015). Por outro lado, Beaudin e Zareipour (2015) analisam os sistemas

HEMS que, em grande parte, consideram controle e otimização. Zhou et al. (2016) avaliam as configurações e métodos empregados para o escalonamento e gestão nesses dispositivos. Cabe comentar que tanto os HEMSs e seu correspondente para qualquer tipo de edificação EMS (do inglês *Energy Management System*) podem ser utilizados para o escalonamento do consumo de energia elétrica frente a programas de DR.

Em termos do escalonamento do consumo e da gestão da energia residencial, Huang, Tian e Wang (2015) utilizam o algoritmo PSO que considera a geração fotovoltaica, bateria residencial e a manutenção de conforto térmico a partir de um modelo específico, em que o ar-condicionado é a única ferramenta de climatização. Cavalca (2018) implementa tal algoritmo para o escalonamento sem considerar a manutenção do conforto térmico. Tanto Huang, Tian e Wang (2015) quanto Cavalca (2018) aplicam variações do PSO para um problema similar ao tratado no presente trabalho, e apresentam desempenhos compatíveis em relação ao *solver* de solução exata CPLEX. Entretanto, o *solver* apresenta a melhor solução em ambos os casos.

Nesse contexto, Liu (2016) comprova que o escalonamento do consumo de energia elétrica é um problema NP-difícil (Não-determinístico Polinomial difícil), assim considerado se um algoritmo para o resolver é redutível em tempo polinomial para um algoritmo capaz de resolver um problema NP (DU; SWAMY, 2016). Em estudos levantados por Vardakas, Zorba e Verikoukis (2015) sobre otimização aplicada a DR baseado em preço, os autores observaram que a maioria dos trabalhos utilizou ou aplicou proposta oriunda do PSO para minimização dos custos de fatura, sendo 26,6% dos estudos considerados.

Quanto à aplicação da tarifa horária branca, também considerada nesse estudo, foi encontrado o trabalho de Affonso e Silva (2015), que consideram apenas a operação da bateria residencial de capacidade de 50 kWh, através do algoritmo de recozimento simulado (SA, do inglês *Simulated Annealing*). Os valores da tarifa considerados são para o estado do Pará, pela concessionária CELPA (Centrais Elétricas do Pará). O modelo não considera o agendamento das cargas, nem o aproveitamento de recursos renováveis e não considera a manutenção do conforto térmico. Entretanto, demonstra economia de R\$ 134,40 por meio do mecanismo em simulação de uma semana.

Com base nos algoritmos de Huang, Tian e Wang (2015) e diante das melhorias no algoritmo implementadas e avaliadas por Cavalca (2018), este trabalho propõe avanço do modelo incluindo as premissas de que o conforto térmico mínimo seja mantido por imposição, a energia solar seja considerada tanto para aquecimento do ambiente e da água e para a geração fotovoltaica, considerando também a presença de *boiler* residencial. Além disso, a bateria residencial será um recurso mantido. Vale destacar que mais detalhes sobre o modelo de otimização do problema que será traduzido para *solver* comercial em estudo será abordado detalhadamente no Capítulo 3.

Capítulo 3

Metodologia

A metodologia proposta para o desenvolvimento deste trabalho utilizou como alicerce dados climáticos disponíveis e dados de posse de hábitos de consumo de energia elétrica de diferentes cidades brasileiras representadas pelos seus estados com diferentes características climáticas. Neste sentido, os resultados alcançados da investigação poderão servir como alicerce para adoção de políticas públicas para reforma ou produção de residências com premissas de arquitetura bioclimática. Assim, seria efetuado um melhor aproveitamento das condições climáticas quando forem convenientes ou ainda proteger os habitantes quando as condições forem desfavoráveis ao cenário de inteligência e sustentabilidade nas residências, redes elétricas e cidades.

Uma simplificação inerente ao processo de climatização de cada residência foi a de que as estratégias ativas ou passivas (por meio do envelope construtivo com abrigos e aberturas) consideradas estariam corretamente equacionadas para atenderem as necessidades mínimas de conforto térmico.

Por um lado, por exemplo, se ocorre uma necessidade de uso de condicionamento artificial de ar em um dado passo de tempo, os respectivos equipamentos para tal tarefa foram supostos capazes de climatizar os cômodos ocupados, e, sendo assim, possuem potência térmica adequada ao recinto em que se encontram. Ademais o consumo médio do equipamento foi considerado como o efetivo em cada passo de tempo, conforme disponível em [PROCEL \(2021b\)](#), por simplicidade. Por outro lado, um exemplo passivo ocorreria quando uma amostra climática externa entrasse na zona de conforto, neste caso foi suposto uma forma adequada de intercâmbio do ar externo com o ar do ambiente interno funcionasse para manter o interior termicamente confortável. E assim foi considerado para as demais estratégias de climatização neste trabalho, simplificando que os aspectos de projeto relacionados com a climatização da residência estariam adequadamente concebidos.

A sequência do trabalho considerou aplicações de escalonamento de eletricidade adaptados para a proposta com cenários e mecanismos de otimização determinística, a

qual seguiu duas etapas:

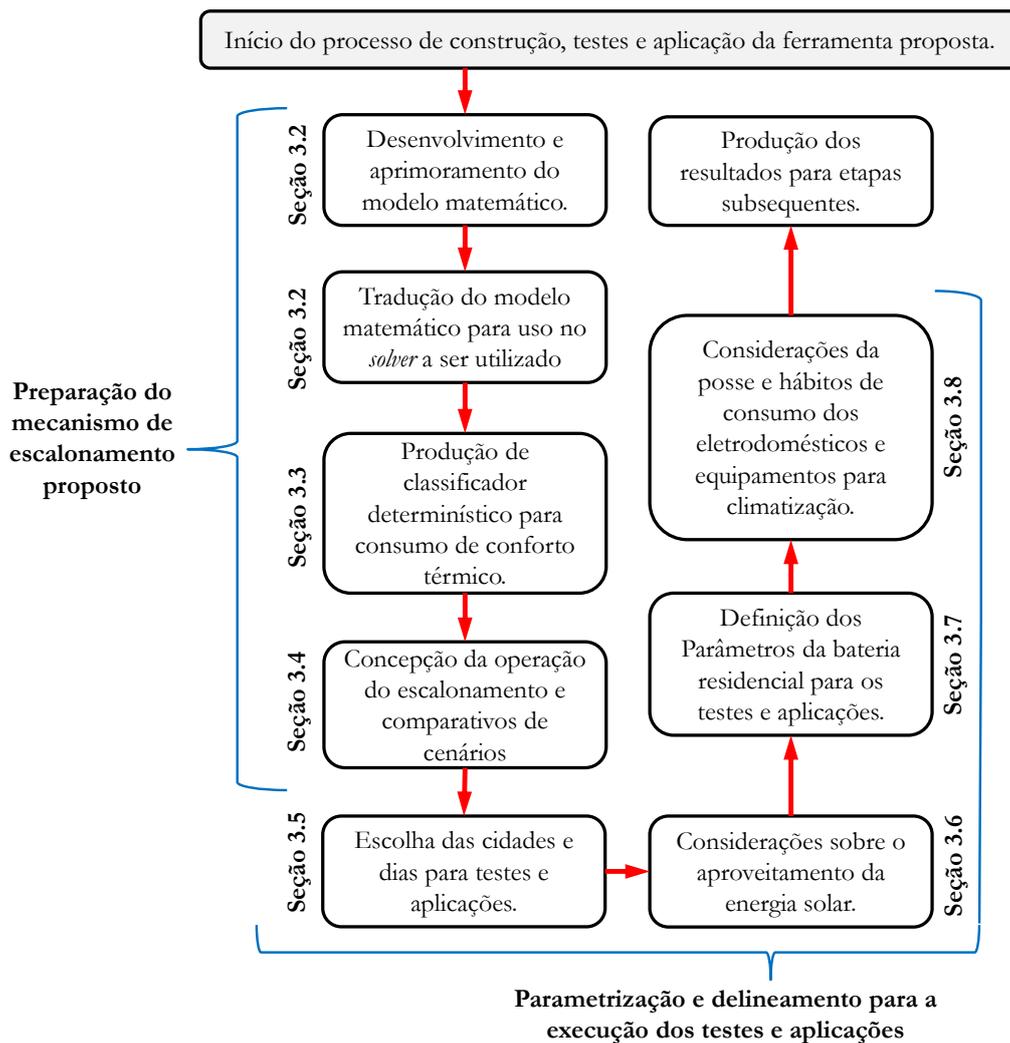
1. Aplicação na cidade de Brasília-DF considerando 8 dias de testes, sendo 4 em cada um dos dois anos de 2019 e 2020, com diferentes padrões de consumo provenientes da pandemia mundial da doença de coronavírus (COVID-19) que impactou mudança de hábitos no ano de 2020. Nesta abordagem foram escolhidos dias de predominâncias das estratégias mais comuns para a cidade em estudo;
2. Aplicação em oito cidades brasileiras, sendo uma para cada zona bioclimática de acordo com o zoneamento bioclimático da norma NBR 15220 (ABNT, 2005), mais especificamente na parte 3 desta norma, selecionando apenas cidades zoneadas na norma, considerando dois dias críticos para cada cidade: um com alta e outro com baixa disponibilidade de radiação solar.

Na sequência, as etapas da metodologia são explanadas e maiores detalhes, bem como as parametrizações consideradas nos testes.

3.1 Estrutura Metodológica Proposta

Para simplificar o entendimento do processo metodológico proposto para as simulações, que envolve várias frentes de trabalho, em três etapas de aplicação foi elaborado um diagrama esquemático com as etapas propostas. A estrutura parte das três vertentes de trabalho que se desenvolveram rumo a consolidação do objeto de estudo que é o desenvolvimento e aplicação e do sistema de escalonamento de consumo de eletricidade proposto. A primeira vertente trata de preparação do mecanismo inovador proposto com base nas lacunas identificadas na literatura científica e a segunda trata dos processos de parametrização dos testes preliminares e aplicações posteriores. Já a terceira vertente trata explicitamente da execução das simulações e análise dos resultados alcançados. O esquema segue apresentado na [Figura 7](#).

Figura 7 – Diagrama esquemático da metodologia executada.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

3.2 Modelo de Otimização Adaptado ao Problema Proposto

Nesta seção serão apresentadas as definições do problema, as tratativas dos diferentes tipos de cargas elétricas no gerenciamento, que envolvem o modelo de otimização e suas adaptações para que atendam a proposta desta pesquisa. O modelo a ser apresentado baseia-se naquele proposto por Huang, Tian e Wang (2015), diferindo da consideração de controle de *setpoint* de um sistema HVAC central baseado em modelo térmico equivalente (ETP, do inglês *Equivalent Thermal Parameters*) e nos modelos apresentados por Mohsenian-Rad e Leon-Garcia (2015) e por Cavalca (2018) que consideram os dispositivos de conforto como eletrodomésticos, porém não se comprometem com a manutenção do conforto térmico.

Portanto, adaptações foram feitas no modelo para contemplar as imposições de conforto térmico para climatização distribuída, a consideração do aproveitamento da

energia solar para geração de energia elétrica, aquecimento solar do interior da residência e aquecimento de água através do SAS (Sistema de Aquecimento Solar) e o emprego do *boiler* elétrico quando a energia solar térmica não é suficiente para as necessidades dos habitantes.

Cabe comentar que outra adaptação necessária ao modelo foi substituir a energia elétrica consumida como parâmetro a ser multiplicado pelo preço tarifário em vez da potência dos equipamentos. Isso foi percebido diante à observação de que alguns eletrodomésticos são utilizados em intervalos de tempo menores que o passo de tempo de escalonamento. Para exemplificar, pode-se considerar o uso de um forno de micro-ondas. De acordo com o PPH-2019 (ELETROBRÁS, 2019), para o estado de Amazonas, o tempo de uso predominante do forno de micro-ondas foi de 10 minutos. Sendo assim, este consumo em Wh deverá ser escalonado dentro de algum passo de tempo e se fosse considerada sua potência nominal, seria necessário um fator multiplicativo extra para transformar esta potência em consumo. Assim, este fator multiplicativo seria necessário em todo eletrodoméstico.

Evidente que quando o aparelho eletrodoméstico é utilizado apenas durante todo passo de tempo de uma hora, a potência irá coincidir com seu consumo. Sendo assim, o modelo matemático, ao considerar a potência do equipamento não implicará em erro. Entretanto, a abordagem aqui apresentada se aproxima de uma maior generalização do escalonamento, haja vista que a precificação tarifária se dá através da moeda corrente pelo consumo de energia elétrica. No caso do Brasil se dá em R\$/kWh e os valores obtidos se aproximarão mais da realidade nacional proveniente do PPH-2019 (ELETROBRÁS, 2019).

Dessa maneira, o problema de escalonamento de consumo de eletricidade pode ser escrito como um problema de minimização de custo da fatura diária, cuja função objetivo pode ser enunciada conforme a [Equação 3.1](#):

$$\min \text{Custo}_d = \sum_{t=1}^{N_{t-dia}} (T_{branca}^{(t)} \times E_{rede}^{(t)}) , \quad (3.1)$$

onde Custo_d representa o custo financeiro da fatura diária em R\$ proveniente do consumo de energia elétrica, $T_{branca}^{(t)}$ é o preço do kWh em cada passo de tempo t , de 1 até N_{t-dia} o número dos passos de tempo ao longo do dia escolhidos para o escalonamento e E_{rede} representa a energia líquida absorvida ou injetada na rede. Dessa forma, a energia líquida ($E_{rede}^{(t)}$) consiste em um balanço energético no passo de tempo que considera as seguintes parcelas:

1. Bateria ($E_{bat}^{(t)}$) – representa a interação da bateria com a rede no passo de tempo t . Pode estar em carga ou descarga, assumindo respectivamente valores positivos ou negativos;
2. Cargas fixas ($E_{fix}^{(t)}$) – trata-se do consumo dos aparelhos eletrodomésticos que não

podem ser desligados em cada passo de tempo t , tais como geladeira e roteador de internet;

3. Cargas de conforto ($E_{conf}^{(t)}$) – faz referência ao consumo dos dispositivos de climatização para garantir o conforto térmico na residência bioclimática no passo de tempo t ;
4. Cargas flexíveis ($E_{flex}^{(t)}$) – trata-se do consumo de aparelhos em cada passo de tempo t que podem ser deslocados. Esses dividem-se em interrompíveis se podem ter seu consumo seccionado ou não interrompíveis se uma vez ligadas devem assim permanecer até o fim do tempo de utilização;
5. *Boiler* ($E_{boiler}^{(t)}$) – emula o consumo de caráter flexível e multiplicado por uma variável binária σ que define se o *boiler* deverá ser acionado no dia corrente ($\sigma = 1$) ou não ($\sigma = 0$), baseado em regra proveniente da disponibilidade de energia solar para aquecimento de água através de coletores;
6. Parcela de geração fotovoltaica ($E_{fv}^{(t)}$) – faz referência à energia média gerada do sistema fotovoltaico em cada passo de tempo t .

Com base nessas definições, em sequência, a [Equação 3.2](#) representa o balanço energético da rede elétrica ao longo do dia que será multiplicado pelo preço tarifário em cada passo de tempo do dia útil, em que sua soma resulta na fatura diária de eletricidade. Para generalizar a distribuição temporal do problema, os passos de tempo t podem ser considerados para horas ou minutos, resultando respectivamente em 24 passos para adoção de horas, 48 para adoção de 30 minutos ou 96 no caso de considerar intervalos de 15 minutos ao longo do dia.

$$E_{rede}^{(t)} = E_{bat}^{(t)} + E_{fix}^{(t)} + E_{conf}^{(t)} + E_{flex}^{(t)} + \sigma \times E_{boiler}^{(t)} - E_{fv}^{(t)} \quad (3.2)$$

Uma vez apresentado a função custo do problema, também se torna necessário apresentar as restrições dele, iniciando-se pelas restrições relacionadas com a operação dos aparelhos eletrodomésticos interrompíveis:

$$\delta_{ap}^{(t)} = 0, \forall t \notin [\alpha_{ap}, \beta_{ap}] , \quad (3.3)$$

$$\sum_{t=\alpha_{ap}}^{t_0-1} \delta_{ap}^{(t)} + \delta_{ap}^{(t_0)} + \sum_{\tau=t_0+1}^{\beta_{ap}} \delta_{ap}^{(\tau)} = D_{ap} , \quad (3.4)$$

$$\sum_{t=\alpha_{ap}}^{\beta_{ap}} \delta_{ap}^{(t)} \times p_{ap} = E_{T_{ap}} \quad (3.5)$$

As cargas interrompíveis devem funcionar o total de tempo estabelecido em um intervalo de operação $[\alpha_{ap}, \beta_{ap}]$ e, fora deste tempo deverão estar desligadas, conforme [Equação 3.3](#). Cada aparelho ap poderá ser ligado e desligado em diferentes passos de

tempo t dentro desse intervalo. Dessa forma, a soma dos *status* binários ($\delta_{ap}^{(t)}$) das cargas flexíveis interrompíveis durante o dia devem corresponder à duração total de uso D_{ap} de passos que não necessitam ser consecutivos, conforme [Equação 3.4](#). A [Equação 3.5](#) reflete a consequência natural de que o somatório de cada *status* binário multiplicado pelo consumo do equipamento em cada passo serão o consumo total daquele aparelho ao longo do dia ($E_{T_{ap}}$).

Já os aparelhos não-interrompíveis operam de forma contínua dentro de seu intervalo de tempo estabelecido, conforme as seguintes restrições:

$$\sum_{t=\alpha_{ap}}^{t_0-1} \delta_{ap}^{(t)} + \delta_{ap}^{(t_0)} + \sum_{\tau=t_0+1}^{\alpha_{ap}+\lambda_{ap}} \delta_{ap}^{(\tau)} \geq 1, \quad (3.6)$$

$$\sum_{\tau=t_0+1}^{t_0+D_{ap}} \delta_{ap}^{(\tau)} \geq D_{ap} \times (\delta_{ap}^{(t_0+1)} - \delta_{ap}^{(t_0)}), \quad (3.7)$$

$$\sum_{t=\alpha_{ap}}^{\beta_{ap}} \delta_{ap,0}^{(t)} = D_{ap} \quad t \in [\alpha_{ap}, \beta_{ap}] \quad (3.8)$$

Uma vez ligadas, as cargas *NI* devem permanecer assim até o fim do período de acionamento total de D_{ap} passos de tempo. Desta forma, a [Equação 3.6](#) apresenta a restrição de que o início de operação de um aparelho deste tipo deve estar contido em um intervalo válido $[\alpha_i, \alpha_i + \lambda_{ap}]$, sendo o termo λ_{ap} um limite de atraso tolerável para o início do funcionamento do aparelho eletrodoméstico. A [Equação 3.7](#) descreve o comportamento *NI* durante a operação, enquanto a [Equação 3.8](#) delimita o funcionamento do aparelho a possuir uma duração máxima de D_{ap} passos de tempo, operando dentro da janela de planejamento $[\alpha_{ap}, \beta_{ap}]$. A partir do exposto, percebe-se que as variáveis controláveis da codificação do problema são as condições dos aparelhos eletrodomésticos que podem ter seu consumo deslocado no tempo ($E_{flex}^{(t)}$) e as quantias de energia elétrica em carga e descarga da bateria a cada período do dia $E_{bat}^{(t)}$.

A utilização da bateria residencial constitui ferramenta que amplia o aproveitamento dos recursos envolvidos quando o preço da energia elétrica é baixo e, principalmente, dos recursos oriundos da geração fotovoltaica. Nesse caso, o algoritmo manipula as configurações de carga e descarga da bateria residencial ao longo do dia, considerando restrições para manter sua vida útil. Nesse contexto, as primeiras restrições relativas a seu uso são descritas conforme [Equação 3.9](#) e [Equação 3.10](#):

$$0 \leq \frac{E_{bat}^{cg(t)}}{\eta_{cg}} \leq E_{cg}^{max}, \quad (3.9)$$

$$0 \leq E_{bat}^{dcg(t)} \times \eta_{dcg} \leq E_{dcg}^{max}, \quad (3.10)$$

onde $E_{bat}^{cg(t)}$ representa a quantidade de carregamento da bateria, η_{cg} a eficiência do ciclo de carga, E_{cg}^{max} exprime o limite de carregamento da bateria, $E_{bat}^{dcg(t)}$ representa a quantidade de

descarregamento da bateria, η_{dcg} a eficiência do ciclo de descarga e E_{dcg}^{max} a potência máxima de descarga, sendo que todas as variáveis indicadas com $^{(t)}$ são relativas à ocorrência em um passo de tempo t .

Salienta-se que a carga na bateria no passo t ($E_{bat}^{(t)}$) em processo de carga é ilustrada pela [Equação 3.11](#), bem como o processo de descarga pela [Equação 3.12](#). Assim, quando a bateria estiver em um destes estados, deverá respeitar uma das dessas restrições, visto que as duas situações não ocorrerão ao mesmo tempo.

$$E_{bat}^{(t)} = \frac{E_{bat}^{cg(t)}}{\eta_{cg}} \quad (3.11)$$

$$E_{bat}^{(t)} = E_{bat}^{dcg(t)} \times \eta_{dcg} \quad (3.12)$$

Na verdade a energia de carga ou descarga da bateria com a rede ($E_{bat}^{(t)}$) seria uma composição algébrica de carga e descarga, sendo assim duas variáveis de decisão componentes da ($E_{bat}^{(t)}$) ficando conforme a [Equação 3.13](#).

$$E_{bat}^{(t)} = \frac{E_{bat}^{cg(t)}}{\eta_{cg}} - E_{bat}^{dcg(t)} \times \eta_{dcg} \quad (3.13)$$

Conforme já destacado a bateria não poderá ser carregada e descarregada no mesmo passo de tempo t , sendo assim foi necessária a inserção de duas variáveis auxiliares binárias ($\theta_{cg}^{(t)}$ e $\theta_{dcg}^{(t)}$) na [Equação 3.13](#) no modelo de otimização do problema, de modo que esta equação fique conforme segue em [Equação 3.14](#).

$$E_{bat}^{(t)} = \theta_{cg}^{(t)} \times \frac{E_{bat}^{cg(t)}}{\eta_{cg}} - \theta_{dcg}^{(t)} \times E_{bat}^{dcg(t)} \times \eta_{dcg} \quad (3.14)$$

E para garantir que a bateria não seja carregada e descarregada no mesmo passo de tempo a soma destas variáveis deve ser igual a um, como tratam-se de variáveis binárias, apenas uma situação ocorrerá a cada passo de tempo, conforme estabelecido na restrição dada na [Equação 3.15](#).

$$\theta_{cg}^{(t)} + \theta_{dcg}^{(t)} = 1 \quad (3.15)$$

Desta forma a bateria será carregada ou descarregada em cada passo de tempo t , de tal forma que fique com uma determinada quantidade de carga que também deverá estar sujeito a restrições para que a vida útil da bateria seja preservada. O estado de carga (EDC), que representa o valor por unidade de carga na bateria em cada passo de tempo t , deverá ser conforme a [Equação 3.16](#) no passo de tempo adiante ($EDC^{(t+1)}$), ou seja, corresponder ao estado de carga atual somado à parcela positiva em caso de carga ou negativa em caso de descarga. Ademais o valor de $E_{bat}^{(t)}$ poderá assumir valores positivos ou negativos conforme a já apresentado na [Equação 3.14](#).

$$EDC^{(t+1)} = EDC^{(t)} + \frac{E_{bat}^{(t)}}{C_{bat}} \quad (3.16)$$

Por fim, o EDC atual da bateria em cada passo de tempo ($EDC^{(t)}$) não poderá

ultrapassar um estado de carga máximo (EDC^{max}) ou ficar com valor de carga inferior a um estado de carga mínimo (EDC^{min}), conforme Equação 3.17. Essas restrições garantem um maior tempo de vida útil para a bateria.

$$EDC^{min} \leq EDC^{(t)} \leq EDC^{max} \quad (3.17)$$

Cabe comentar que esta modelagem do problema pode ser aplicada também a programas de DR com outras modalidades tarifárias, tais quais a precificação em tempo real (RTP) e a preço de pico crítico (CPP) embora neste trabalho seja considerada a modalidade TOU. Para tal mudança bastaria parametrizar adequadamente o preço da tarifa em cada passo de tempo.

Neste trabalho a otimização determinística foi o mecanismo adotado com tradução do modelo matemático na linguagem AMPL a partir de diretrizes de Fourer, Gay e Kernighan (2003) e Taha (2008). Esta consideração foi efetuada porque neste caso seria garantida a otimalidade da solução, que dificilmente seria alcançado por metaheurísticas.

O modelo considerado, adaptado e aplicado nesta tese configura um problema de Programação Linear Inteiro Misto (PLIM), uma vez que parte das variáveis são inteiras, particularmente binárias, e refletem o estado de acionamento de cada eletrodoméstico em cada passo de tempo, por esta razão o tamanho desta parte da solução é proporcional ao número de aparelhos considerados e ao total de passos de tempo adotado no escalonamento. Já a carga ou descarga da bateria em cada passo de tempo compõe variáveis contínuas do problema, o que retrata a característica mista dele, além de que o problema possui restrições e funções lineares, sendo assim resolvida por um solver determinístico para PLIM. Por objetivar uma minimização também é convexo e o solver chamado para a solução do problema foi, particularmente, o IBM CPLX™.

Todas as simulações desta tese foram efetuadas em notebook com processador com velocidade de processamento 2,30 GHz e 8 GB de memória RAM. As simulações para a solução exata (IBM CPLX) foram executadas ao menos duas vezes a título de conferência e seus resultados analisados, pois eles não devem variar em diferentes execuções no caso do uso de solucionador determinístico.

3.3 Classificação Estratégica e Consumo Basal Imposto

Nesta seção será apresentado o método aplicado para classificar as amostras climáticas, ou seja, lançar tais amostras em conjunto de regras baseadas na carta bioclimática e suas respostas por meio do software *AnalysisBio V.2.2* (ONO, 2010). Destaca-se que este procedimento foi imprescindível para a escolha dos dias de teste, pois por meio desse mecanismo foi possível filtrar dias em que a análise do escalonamento seria de maior interesse para esta proposta.

A nomenclatura adotada nesta tese considera o uso da expressão “*consumo basal*” que por um lado empresta o conceito de biologia, relativo ao metabolismo basal dos seres vivos. Esta analogia se torna conveniente uma vez que a ligação dos equipamentos considera um dispêndio mínimo de energia para a manutenção do conforto térmico dos habitantes na residência, levando em conta a premissa de que o projeto seja bioclimático, ou seja, adequado ao clima. Por outro lado, o uso da palavra “imposto” é aplicado porque, no mecanismo desenvolvido, o dispositivo indicado para ser acionado pela carta bioclimática será impositivamente ligado nos passos de tempo em que ela é indispensável, de maneira similar aos aparelhos de uso fixo, salvo a exceção de quando os recintos não são ocupados.

Com intuito de relatar adequadamente o método para lançamento dos pontos na carta bioclimática de Givoni (1992) para países de clima quente e em desenvolvimento visando a classificação determinística das amostras de dados climáticos, a Figura 8 ilustra didaticamente as zonas da referida carta bioclimática. Para melhorar a visualização, as regiões geométricas resultantes foram numeradas na legenda original e indicadas novas regiões (10 a 13) advindas das delimitações das demais zonas com sobreposição nas 10, 11 e 12.

Figura 8 – Ilustração da carta bioclimática para e Givoni (1992) para países em desenvolvimento de clima quente.



Fonte: Adaptado de Lamberts, Dutra e Pereira (2013).

A carta psicrométrica também conhecida como carta de Carrier é muito aplicada em projetos e estudos de ar-condicionado e sistemas de climatização em geral. Para este trabalho, quatro principais variáveis foram consideradas nas regras das delimitações das zonas, são elas:

1. Temperatura de bulbo seco (T_{BS} , dada em $^{\circ}\text{C}$) – conhecida como temperatura do ar;

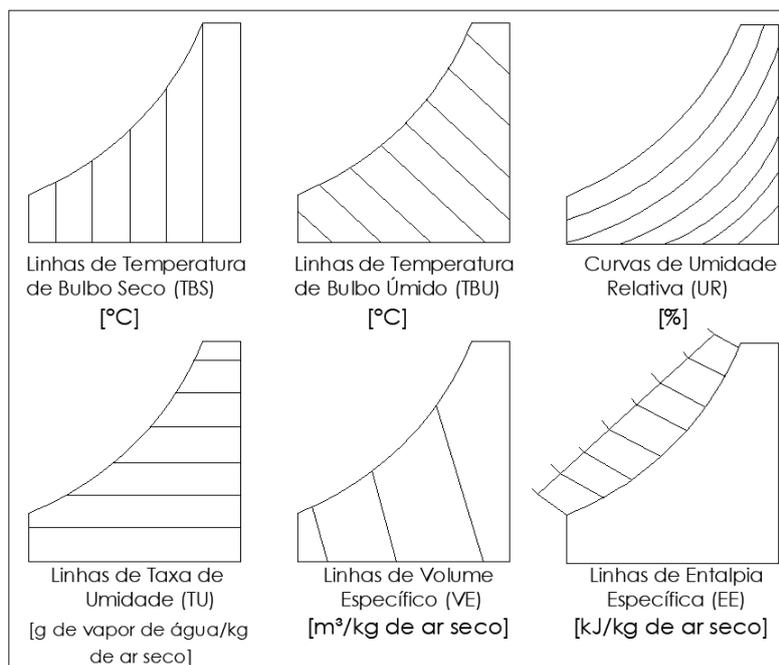
2. Temperatura de bulbo úmido (T_{BU} , dada em [°C]) – é a temperatura do ar com o bulbo envolto por uma mecha com água destilada e pode ser obtida por meio de cálculo iterativo ao se considerar uma dada altitude e uma combinação de outras variáveis, como T_{BS} e U_{REL} ;
3. Umidade relativa (U_{REL} , dada em [%]) – é a razão entre a fração molar do vapor d'água presente na mistura real e a fração molar que o vapor d'água teria se a mistura tivesse saturada à mesma temperatura e pressão total;
4. Umidade absoluta (U_{ABS} , dada em $[\frac{g_{vapor\ de\ agua}}{kg_{ar\ seco}}]$) – constitui a taxa entre a massa de vapor de água em relação à massa total de ar seco do mesmo ar.

As zonas da carta psicrométrica são estabelecidas por regras provenientes de curvas e retas delimitadas por valores constantes das variáveis da carta conforme suas graduações e retas complementares. As delimitações constantes são provenientes de valores constantes de temperatura de bulbo úmido (T_{BU}) que resultam em retas diagonais e valores constantes de umidade relativa (U_{REL}) que, por sua vez, resultam em curvas paralelas com a curva limite da carta, conforme observado na [Figura 9](#) ou ainda valores constantes de taxa de umidade (ou umidade absoluta, U_{ABS}) e temperatura do ar (ou temperatura de bulbo seco, T_{BS}) ou de outras das variáveis da ilustração. Já as retas complementares podem ser descritas como equações de retas onde a U_{ABS} representa a variável dependente no eixo das ordenadas e a T_{BS} , no eixo das abcissas seria a variável independente, assim com ao menos dois pontos dessas retas se torna possível descrever equações a serem utilizadas como regras para classificar cada amostra que entre na carta.

Para exemplificar o processo de construção de regras será tomada como referência a zona da ventilação. Para isso, [Lamberts, Dutra e Pereira \(2013\)](#) apresenta algumas das delimitações desta zona. Sua ilustração foi tomada como ponto de partida para mostrar outras delimitações desconhecidas e necessárias para completar o conjunto de regras para classificação das amostras. Foi então construída a [Figura 10](#) mostrando algumas regras não evidenciadas pelos autores da ilustração original.

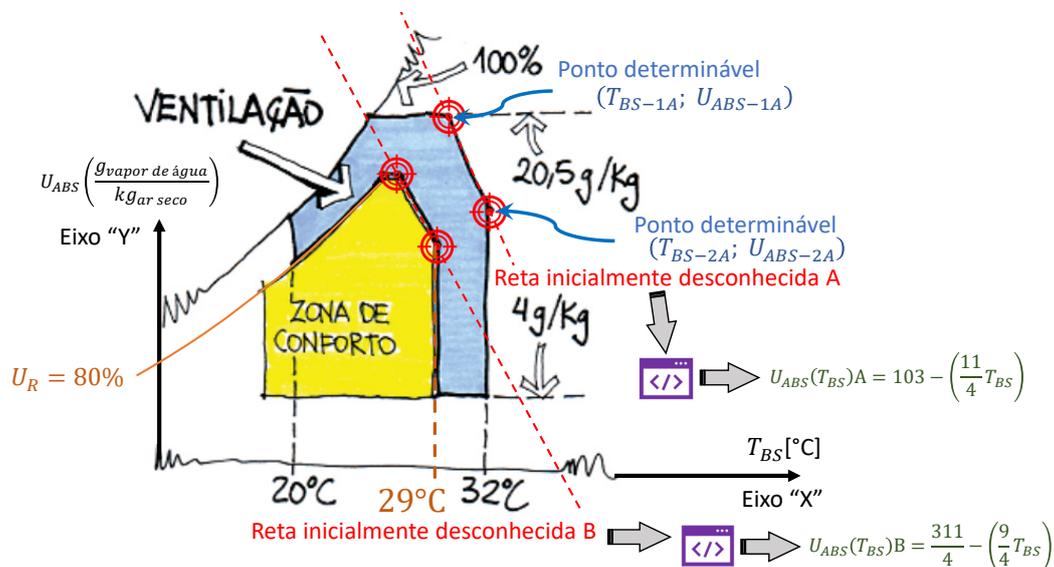
Por meio da [Figura 10](#), é possível perceber que foram adicionadas uma curva de $U_{REL} = 80\%$ constante, uma reta vertical constante de $T_{BS} = 29^{\circ}\text{C}$ e duas retas que eram inicialmente desconhecidas (A e B), entretanto, dois pontos pelos pares ordenados de T_{BS} e U_{REL} seriam conhecidos, possibilitando a determinação na equação dessas retas. Sendo a figura meramente ilustrativa, os pontos faltantes determináveis de cada uma das duas retas foram extraídos da carta psicrométrica em escala elaborada por [Bogo et al. \(1994\)](#) e conferida com os pontos da carta do software *AnalysisBio V.2.2* ([ONO, 2010](#)). De posse das retas, foram elaboradas regras para todas as zonas e sobreposições de zonas na carta, utilizando funções e limites de variáveis constantes tais quais as obtidas nas delimitações da zona de ventilação.

Figura 9 – Linhas e curvas das variáveis climáticas na carta psicrométrica.



Fonte:Elaborado pelo Autor (2021).

Figura 10 – Complemento de regras para a zona de ventilação.



Fonte:Adaptado de Lamberts, Dutra e Pereira (2013).

Vale destacar que as delimitações conhecidas eram apenas de valores constantes das quatro variáveis necessárias e retas em equações de primeiro grau, onde a U_{ABS} se torna uma função de T_{BS} . Assim, um algoritmo implementado em R (R Core Team, 2019) foi empregado para rotular cada amostra e indicar a zona ou uma região de superposição de zonas da carta. No caso, as zonas com superposição de zonas consideram a estratégia ativa mais abrangente dentre as que se sobrepuseram. Como exemplo, na superposição

das zonas de massa térmica para resfriamento, ventilação e resfriamento evaporativo, região 11 da figura [Figura 8](#), o resfriamento evaporativo será considerado como estratégia preponderante, uma vez que a massa térmica será considerada na concepção da residência e o climatizador evaporativo também ventila o ar no ambiente ao mesmo tempo que o umidifica. Embora seja uma estratégia mais cara energeticamente, é mais provável que ela garanta o conforto térmico.

Depois da classificação das estratégias preponderantes foi implementado um agrupamento de zonas que resultam em cinco principais, enumeradas a seguir:

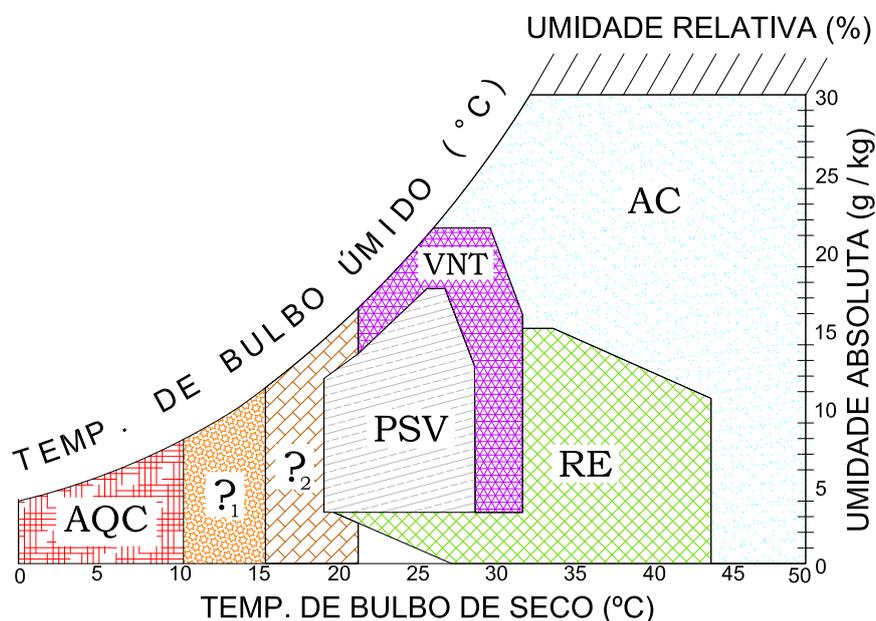
1. Estratégias passivas (PSV) – representa as amostras climáticas na zona de conforto e nas zonas de massa térmica para aquecimento solar e aquecimento solar passivo quando a radiação solar é disponível, haja vista que em dias nublados o aquecimento artificial com potência reduzida passa a ser necessário;
2. Ventilação (VNT) – representa toda a zona de ventilação, sendo necessária, neste caso, o acionamento de ventiladores de teto, piso ou pedestal;
3. Resfriamento evaporativo (RE) – equivale a zona de resfriamento evaporativo mesmo em sobreposição das zonas de ventilação e massa térmica para resfriamento, corresponde a amostras climáticas de alta temperatura e baixa umidade do ar quando o resfriamento ocasionado pela evaporação do ar em conjunto com a ventilação é suficiente para levar a condição de conforto, considerando um climatizadores evaporativos do tipo direto disponíveis comercialmente no Brasil;
4. Aquecimento artificial (AQC) – equivale a zona de aquecimento artificial com isolamento térmico quanto o aquecedor é considerado ligado em sua máxima capacidade de aquecimento adicionado de amostras onde a radiação solar seja baixa ou indisponível (no caso do período noturno), sendo que quando a amostra entra na zona de inércia térmica com aquecimento solar ou aquecimento solar passivo com isolamento térmico o aquecedor foi considerado como ligado em meia capacidade de aquecimento, ajuste comumente encontrado nos aquecedores comerciais do Brasil;
5. Ar-condicionado (AC) – quando uma amostra entra nesta zona o condicionador de ar deve ser ligado, entretanto considera-se que o equipamento esteja adequadamente dimensionado e a envolvente construtiva seja adequada para garantir o conforto térmico de maneira eficiente.

Um destaque importante a ser dado é que na zona agrupada de ventilação, apenas a ventilação mecânica foi considerada, isso devido à complexidade envolvida com relação as aberturas para este tipo de ventilação, a direção do vento e sua velocidade. Ademais, de acordo com [Liddament \(1996\)](#), a rugosidade das superfícies urbanas e as diferenças entre a

altura de medição do vento de estações climáticas e a altura das aberturas das edificações acarretam imprecisões para estimar a velocidade do vento no interior das residências, quiçá então para verificar se a ventilação natural seria suficiente para levar a uma condição de conforto.

Destaca-se que mais de 20 regras foram obtidas para que o sistema pudesse determinar adequadamente as estratégias bioclimáticas e seu posterior agrupamento. A zona de umidificação foi inicialmente aventada para ser considerada como uma estratégia que resultaria no acionamento de um umidificador nesses casos, mas dentre os dados considerados dos dias de teste, nenhum ponto caiu nesta zona específica. Para ilustrar representativamente as zonas agrupadas foi elaborada a [Figura 11](#).

Figura 11 – Agrupamento implementado das estratégias.



Fonte:Elaborado pelo Autor(2021).

A região “?₁” da [Figura 11](#) deste agrupamento equivale ao aquecimento solar passivo com isolamento térmico que pode ser considerada uma estratégia passiva caso haja disponibilidade solar ou ativa caso contrário. A mesma análise é considerada para a região de inércia térmica com aquecimento solar, ou seja a região indicada com “?₂”. Neste sentido, no uso abrangente da energia solar, um parâmetro considerado pelos projetistas de SAS, instalações fotovoltaicas e aquecimento solar ambiental de residências é a radiação diária média do local de estudo. Portanto, considerando que os projetos de aproveitamento solar foram adequadamente elaborados, este trabalho adota como parâmetro o fato de que a radiação solar diária em $\frac{kWh}{dia}$ é ou não maior que a radiação diária média. Caso positivo, o aquecedor auxiliar do *boiler* não precisaria ser ligado e o aquecimento da água se daria pelo SAS, caso contrário seria utilizado o sistema elétrico auxiliar do *boiler*. Nos horários de disponibilidade da radiação, as amostras que entrarem nesta zona serão consideradas como

estratégia passiva, caso contrário será considerado necessário o aquecimento solar passivo com potência reduzida pela metade. Para a análise em diferentes cidades brasileiras os dias foram escolhidos de tal forma que para cada uma delas fosse considerado um dia em que a radiação solar fosse suficiente e outro dia em que fosse insuficiente, em acordo com a regra apresentada.

De posse desses dados rotulados foi efetuada separação das amostras e lançadas no *AnalysisBio v.2.2* (ONO, 2010) para verificar se o algoritmo desenvolvido classifica corretamente os dados climáticos do ano de 2009 da cidade de Cuiabá-MT do arquivo EPW (do inglês *EnergyPlus Weather*) e os erros obtidos foram menores que 2% (1,7% ou 149 horas do ano). Entretanto, o filtro desenvolvido no R se mostrou mais rígido, exigindo dentro destas 8670 horas um percentual adicional de condicionador de ar (1,1%) e resfriamento evaporativo (0,6%) do que a carta propriamente dita. Esta diferença pode ser proveniente da adoção de regras em que nas zonas de transição ou muito próximo de seus limites as amostras sejam classificadas em regiões distintas do lançado graficamente na carta. Outra origem possível desta diferença pode decorrer da disparidade de abordagem entre o programa consolidado baseado em método gráfico e o algoritmo desenvolvido para este trabalho que é baseado em cálculo de funções matemáticas.

De qualquer forma, para todo dia de teste as amostras climáticas foram lançadas no software *AnalysisBio v. 2.2* para conferir visualmente se o mecanismo de classificação pelo software R estava correto e, de fato, para as análises horárias o algoritmo não errou amostra alguma utilizada nesta tese. A vantagem da implementação do código no R é justamente a de efetuar os filtros para escolher dias interessantes para a análise e rotular cada amostra com esta classificação.

Assim, com a base de dados e rótulos consolidada foi possível fazer diferentes análises, como a escolha dos dias do ano com mais demanda por aquecedor artificial, ar-condicionado, resfriamento evaporativo ou ventilador ou os dias que dispensem qualquer dispositivo destes. Também se tornou possível dar entrada no mecanismo de escalonamento aplicado em cada teste considerado com uma curva basal imposta usando o consumo típico dos dispositivos necessários para a climatização dos cômodos da residência em estudo.

3.4 Esquema de Escalonamento e Comparativos Propostos

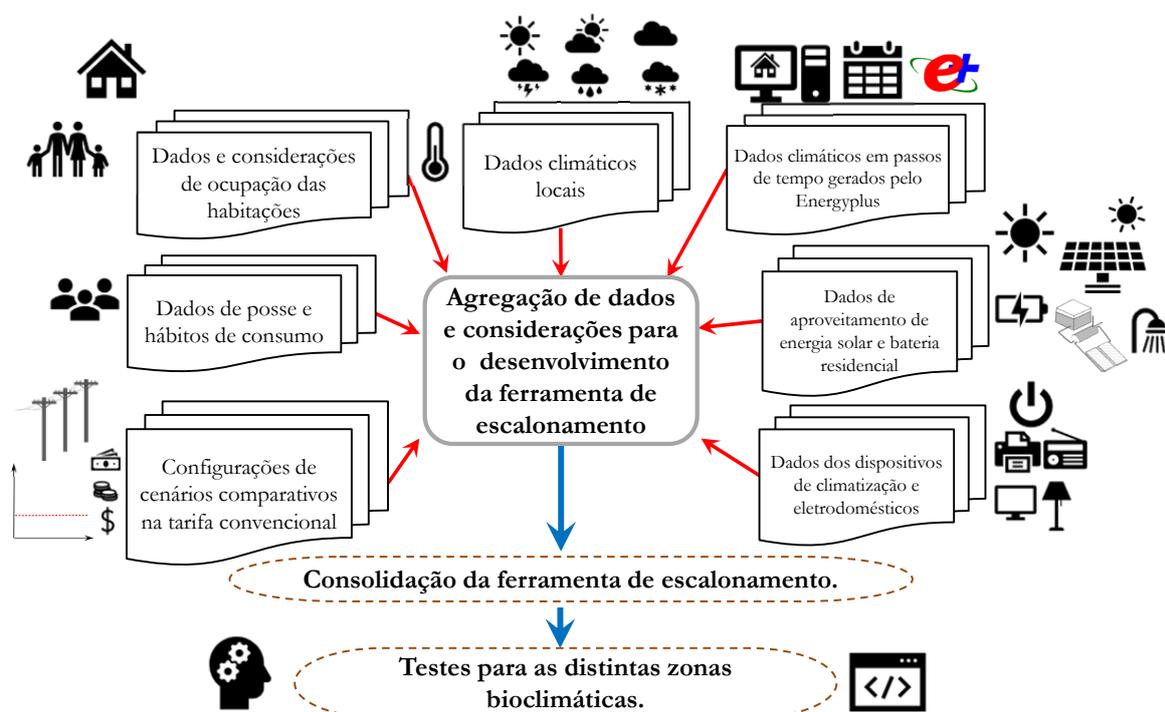
Conforme já comentado anteriormente o trabalho trata da proposição e aplicação de um sistema inteligente no escalonamento do consumo de energia elétrica residencial participante do DRP denominado como tarifa horária branca. A partir de séries de dados climáticos, sociais e energéticos foi desenvolvida a ferramenta proposta com enfoque na sustentabilidade que passou por fase de testes preliminares e aplicações práticas variando

os cenários comparativos de diferentes maneiras. São apresentados nesta seção esquemas relacionados ao processo de concepção do mecanismo, bem como um esquema para a realização de comparativos na tarifa horária branca.

3.4.1 Concepção e Operação do Escalonamento

A Figura 12 ilustra a agregação das diversas fontes de dados e considerações pertinentes para a aplicação da metodologia em cenários simulados e avaliação comparativa com cenários equivalentes na tarifação convencional.

Figura 12 – Agregação de dados e considerações para concepção da proposta.



Fonte: Elaborado pelo Autor(2021).

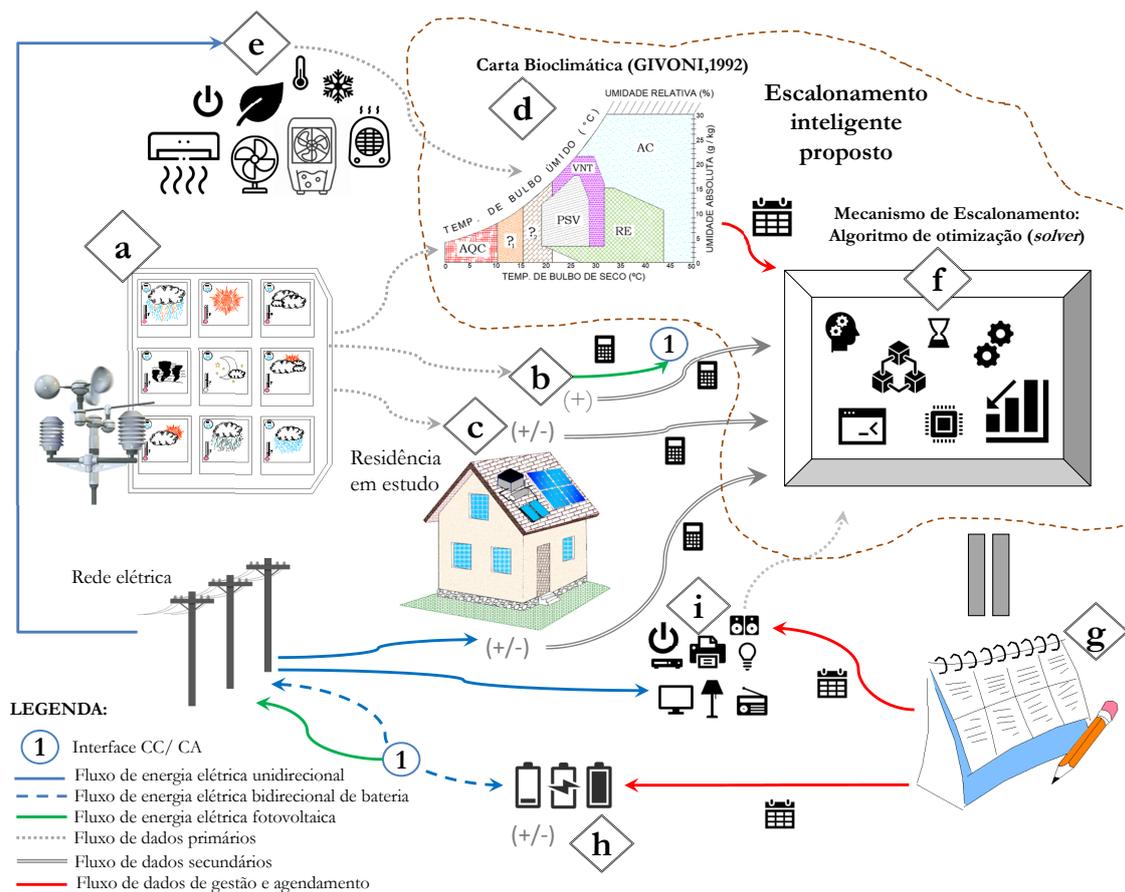
Cabe lembrar que os dados climáticos disponíveis foram considerados como dados previstos assertivamente para atuação simulada no sistema proposto. Assim, para cada passo de tempo t do dia seguinte deve ocorrer a classificação adequada no horizonte diário de cargas relacionadas com a manutenção de condições básicas de conforto térmico, gerando uma curva denominada de curva basal de conforto térmico imposta durante os passos de tempo t do dia ($E_{conf}^{(t)}$). Destaca-se que este primeiro mecanismo trabalha levando em conta a estratégia ativa necessária mais abrangente.

Já o segundo mecanismo aproveita os recursos de deslocamento de consumo, energia solar térmica e fotovoltaica e da bateria residencial para efetuar o escalonamento do consumo de eletricidade de forma otimizada, minimizando o preço da fatura diária de energia

elétrica para o consumidor residencial no programa de DR baseada em preço denominado tarifa horária branca. Uma vez que o conforto será mantido, a fatura minimizada para o consumidor e o consumo na ponta será reduzido, uma relação ganha-ganha entre concessionária de energia elétrica e consumidor será estabelecida.

Após os dois sistemas serem consolidados, será necessário efetuar os testes de integração dos mecanismos para a residência em estudo, a curva basal imposta entraria como uma curva de consumo consolidada e o mecanismo de escalonamento executaria o agendamento otimizado do consumo e definiria o ciclo de carga e descarga nos passos de tempo t do dia que contém N_{t-dia} passos, aproveitando a energia solar. Sendo assim, a **Figura 13** ilustra o mecanismo completo proposto para a residência estudada. Alguns elementos presentes no processo foram codificados por letras em losangos para auxiliar a explicação do esquema de como este mecanismo funcionaria em uma aplicação real no texto subsequente.

Figura 13 – Mecanismo e fluxos do escalonamento para uma unidade residencial.



Fonte: Elaborado pelo Autor(2021).

O processo do mecanismo proposto na ilustração inicia-se com as condições climáticas (a) que seriam medidas de cada passo do tempo do dia a frente considerando previsão climática. Esta informação seria encaminhada para o sistema de geração de

energia solar fotovoltaica (*b*) e os dados do dia futuro para verificar a necessidade do boiler para produzir a água para o dia adiante ou sua dispensa devido ao aquecimento solar térmico (*c*). Tais condições (*a*) também seriam encaminhadas para a classificação das estratégias pela carta bioclimática e seria efetuada a produção da curva de consumo basal de conforto (*d*) que programaria os equipamentos de climatização (*e*) durante as horas ocupadas das residências. Tal curva seria também informada ao executor do escalonamento (*f*), ou seja, o algoritmo de otimização. O sinal + é utilizado para a geração fotovoltaica porque ele sempre pode contribuir positivamente ao escalonamento. Por outro lado, o sinal $+/-$ indica que pode contribuir positivamente reduzindo a fatura pelo preço ou injeção de bateria ou negativamente caso a bateria esteja em carga no passo de tempo t .

O mecanismo de escalonamento (*f*) receberia também informações sobre os aparelhos eletrodomésticos (*i*) juntamente com o tempo de uso ou duração em passos de tempo necessários para o funcionamento deles, bem como suas janelas de acionamento $[\alpha_{ap}, \beta_{ap}]$ em que devem ser utilizados e com estes parâmetros providenciar o escalonamento do consumo (*g*). O escalonamento definido (*g*) deve agendar o funcionamento dos eletrodomésticos (*i*) e o ciclo da carga e descarga da bateria (*h*) nos passos de tempo t do dia. A interface de injeção da bateria e da instalação fotovoltaica é feita por inversor de frequência e o carregamento da bateria por retificador ou em uma estrutura de interface CC/CA considerada adequada (1).

A mesma ilustração também demonstra, por meio de diferentes configurações de linhas, os fluxos de diferentes informações (dados) e os fluxos energéticos. Os fluxos de dados foram subdivididos em três categorias, a primeira foi denominada de dados primários que consiste nas informações provenientes do clima previsto nos passos de tempo do dia N_{t-dia} dos sistemas de climatização existentes na habitação (*e*) que são também consumidores de energia elétrica, do cronograma de ocupação, dos eletrodomésticos (*i*) e seus parâmetros.

A segunda categoria de fluxo de dados envolve cálculos matemáticos para que a partir dos dados climáticos obtenham-se dados processados para posterior utilização, por isso denominada como dados secundários, como é o caso da instalação de geração fotovoltaica (*b*) e do SAS com boiler (*c*) que recebem dados climáticos em fluxo primário e após processarem cálculo os enviam para a entrada do sistema de escalonamento (*f*).

A terceira categoria diz respeito a dados de gestão e agendamento, como é o caso do fluxo que parte do sistema inteligente de classificação (*d*), para os eletrodomésticos e para o sistema de escalonamento (*f*), bem como partem de (*f*) para os eletrodomésticos (*i*) e para a gestão diária da bateria (*h*).

No contexto do fluxo de energia, embora pareça que o boiler (*c*) e eletrodomésticos (*i*) sejam unicamente alimentados pela rede elétrica, nem sempre será o caso, visto que a

fonte pode se tratar de injeção da bateria ou autoconsumo de energia oriunda de fonte fotovoltaica, entretanto se torna necessário que esta energia seja convertida em corrente alternada por (1). A bateria ou ESS (h) é o único sistema de energia bidirecional devido a sua característica de carga e descarga. Já a instalação fotovoltaica envia energia para a rede em uma configuração *on grid*, uma vez que não se deseja realizar operação isolada.

Na infraestrutura proposta será considerada a tarifa horária branca que possui distribuição horária ou em frações de 30 minutos para as transições de patamar tarifário. Antevendo-se para os intervalos em que hoje são considerados para os consumidores do Grupo A (consumidores conectados em tensão primária, superior a 2,3 kV), que possuem medição de demanda em intervalos de 15 minutos, foi adotado tal intervalo de tempo para o escalonamento. Entretanto a aplicação inicial tanto do mecanismo de produção de consumo basal quanto no de escalonamento foram efetuados com fragmentação horária do dia (24 passos).

3.4.2 Comparativos de Cenários na Tarifa Convencional

Esta seção apresenta, em linhas gerais, a gama de cenários na tarifa convencional que será utilizada como parâmetro de comparação ao cenário inteligente e sustentável proposto nesta tese. As variações dos cenários foram ocorrendo com a evolução da pesquisa e tem como objeto principal analisar as vantagens em termos de custo de fatura diária e de consumo de energia a ser compensado. Ademais, reporta também particularidades observadas de posse de aparelhos eletrodomésticos, moradores na residência e hábitos de consumo evidenciados no PPH-2019 ([ELETROBRÁS, 2019](#)).

Foram considerados sete diferentes cenários, em que o primeiro deles se baseia na tarifa horária branca com o escalonamento e gestão de bateria residencial, enquanto os seis demais cenários foram todos baseados na tarifa convencional e sem bateria residencial. Todos esses cenários são descritos na sequência:

1. Casa Inteligente Bioclimática – proposta principal desta pesquisa e, portanto, tem-se como referência;
2. Água fria com UFV (ou SAS com UFV) – depende da radiação solar no dia ou da ausência do chuveiro nas residências. Por um lado, a condição de água fria é quando não há chuveiro ou nenhum meio de aquecimento de água na residência. Por outro lado, se há a presença do SAS e ele aquece a água com a radiação e não haverá consumo de eletricidade para aquecimento de água, sendo assim similar ao cenário da água fria na tarifa convencional. Portanto, são cenários equivalentes, ademais considera a presença de UFV (usina fotovoltaica) de microgeração;

3. Água fria sem UFV (ou SAS sem UFV): Similar ao anterior, entretanto sem a UFV na residência;
4. *Boiler* com UFV: Conta com aquecimento elétrico e armazenamento de água quente com presença da UFV na residência, a vantagem do aquecimento de água central é que este sistema se torna uma carga escalonável não interrompível (*NI*), não há SAS na residência;
5. Chuveiro com UFV: Considera o uso do chuveiro elétrico como meio para aquecimento da água durante o período do banho, entretanto este mesmo chuveiro é escalonável e *NI*, também há a UFV na residência. Apenas na aplicação em 96 passos de tempo este cenário também é considerado o uso de torneiras elétricas na residência para que a equivalência ao uso de *boiler* seja adequada;
6. *Boiler* sem UFV: Conta com aquecimento elétrico e armazenamento de água sem a presença da UFV na residência e sem SAS, ou seja, não considera estas duas categorias de aproveitamento da energia solar;
7. Chuveiro sem UFV: Considera o uso de sistemas de aquecimento de água sem armazenamento (como o chuveiro e torneiras elétricas) sem a presença da UFV na residência.

3.5 Escolha das Cidades para as Análises Propostas

A cidade de Brasília-DF (capital do Brasil e do Distrito Federal) foi selecionada para a primeira aplicação em 24 passos de tempo com 8 dias de aplicação, sendo quatro dias em cada ano representante de cada uma das estratégias preponderantes. Posteriormente, Brasília foi mantida como representante da zona bioclimática 4 e foram selecionadas mais 7 cidades brasileiras, uma para cada zona bioclimática com dois dias de teste para cada cidade, um com geração fotovoltaica favorável e outro desfavorável.

3.5.1 Cidade para Aplicação em 24 Passos de Tempo

Para a aplicação em escala horária foi considerada a cidade de Brasília, capital federal do Brasil, haja vista que na época de consulta no portal de postos tarifário da ANEEL já aqui citado ([ANEEL, 2021a](#)) na data de 4 de fevereiro de 2021 esta era a capital mais populosa que possuía distribuição horária das transições da tarifa de energia elétrica.

A cidade de Brasília-DF localiza-se na latitude 15.8° sul, com altitude de 1.161,42 m. Classificada conforme classificação de Köppen “Aw” ou clima tropical de savana com uma estação seca e outra úmida ([BIMAGANBETOVA; MEMON; SHERIYEV, 2020](#); [ALVARES](#)

et al., 2013). De acordo com WMO (2021), para um período de 30 anos (1961-1990), a menor média mensal da temperatura mínima diária foi de 13,3 °C no mês de junho, e a maior média mensal da temperatura máxima diária foi de 27,5 °C, no mês de outubro. Além disso, a menor média mensal de precipitação diária foi de 8,8 mm no mês de junho e a maior média mensal de precipitação diária foi de 248,6 mm no mês de dezembro. Essa variação de precipitação reforça a classificação em estações seca e úmida com variações de umidade relativa nestes períodos.

Ademais, foram efetuadas duas análises na carta bioclimática através do *software Analysisbio v.2.2* (ONO, 2010) com dados climáticos dos arquivos EPW dos anos de 1963 obtido do TRY da base SWERA (*Solar Wind and Energy Resource Assessment*) obtidos em (LABEEE, 2022a) e de 2001 oriundos da base do INMET atualizados em 2018 e disponíveis em (LABEEE, 2022b). Mediante as análises efetuadas a necessidade por ar-condicionado só apareceu em 1963 com 0,0342% das horas do ano, sendo para ambos os anos as estratégias dominantes contra o desconforto foram as de ventilação (17,3% para 1963 e 6,32% para 2001 das horas de desconforto por calor) e aquecimento solar com alta inércia térmica (34,1% para 1963 e 32,5% para o ano de 2001, das horas de desconforto por frio). Além disso uma parcela considerável ficou na região de conforto térmico (41,4% para 1963 e 60% para o ano de 2001).

A partir destas observações as demais estratégias predominariam e o ar-condicionado não seria utilizado. Com o contexto da pandemia de COVID-19 e a mudança do perfil de ocupação das residências este trabalho considerou então dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2021) dos anos de 2019 e 2020, ano antecedente e ano efetivo da epidemia. Entre as políticas contra o contágio da doença o isolamento social foi muito difundido e trouxe consequências de maior permanência dos habitantes em suas residências, entre outros efeitos sociais conforme Hsiang et al. (2020).

Apesar do arquivo conter todos os dados de radiação solar necessários para a análise, foi necessário completar os dados da estação que não possuem temperatura de bulbo úmido e umidade absoluta, variáveis estas primordiais para os filtros concebidos no *software* R, sendo assim foi necessário utilizar os métodos constantes em ASHRAE (2017) e já estão implementados e foram efetuados através do *software* Psicrom 1.1 (RORIZ; RORIZ, 2016).

A mesma análise climática foi feita e nenhuma amostra climática horária resultou em necessidade do uso de ar-condicionado ocorreu nos anos de 2019 e 2020, o que acaba contrariando a tendência da maior parte dos trabalhos encontrados na literatura correlata que consideraram este meio de climatização isolado ou centralizado como único possível. Ademais a capital federal possui muitos órgãos públicos e centrais de serviços burocráticos de forma que uma parte considerável residente na cidade passaria a exercer educação e trabalho remoto.

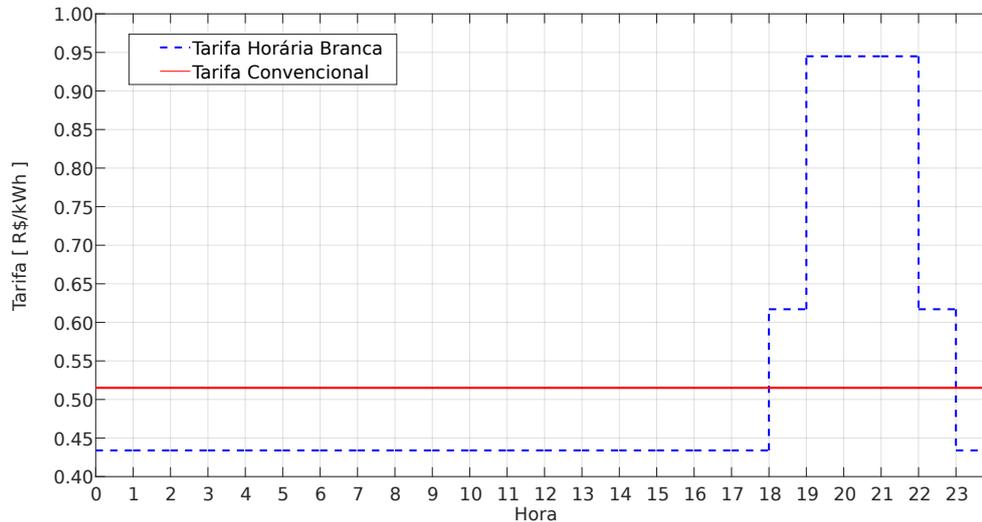
Diferente dos testes preliminares nesta aplicação foi dada uma maior importância para a casa com seus cômodos e sua ocupação, sendo considerada uma casa com uma sala-cozinha conjugada, dois quartos e um banheiro. Para o ano de 2019 a casa foi considerada desocupada entre as 08:00 as 12:00 e em 2020 a casa foi considerada ocupada durante todo o dia, simulando o distanciamento social devido a situação da pandemia.

Para esta primeira aplicação a escolha dos dias de teste foi baseada nas predominâncias das quatro estratégias de cada ano. Portanto em cada ano foi buscado um dia com mais horas necessárias para cada estratégia, sendo elas:

1. Estratégias passivas (PSV): nenhum equipamento de climatização é requerido;
2. Ventilação mecânica (VNT): uso dos ventiladores dos cômodos;
3. Resfriamento Evaporativo (RE): uso dos climatizadores dos cômodos;
4. Aquecimento artificial (AQC): uso dos aquecedores nos cômodos;

A tarifa horária branca aplicada foi extraída dos sites dos postos tarifários e ranking das tarifas da ANEEL (ANEEL, 2021a; ANEEL, 2021b) com valor fora de ponta de $0,434 \frac{R\$}{kWh}$, intermediário de $0,617 \frac{R\$}{kWh}$ e tarifa de ponta de $0,945 \frac{R\$}{kWh}$. A acomodação das horas ficou com transição em hora cheia, conforme pode ser observado na Figura 14.

Figura 14 – Tarifas consideradas para aplicação na cidade de Brasília-DF.



Fonte:Elaborado pelo Autor(2021).

Para essa aplicação, foi considerado como mecanismo de escalonamento o *solver* IBM CPLX através da linguagem AMPL, uma vez que este garante a solução ótima possível. Os demais detalhes sobre UFV, SAS, bateria residencial, eletrodomésticos de uso e conforto serão detalhados nas seções subsequentes.

3.5.2 Escolha das Cidades para Distintas Zonas Bioclimáticas Brasileiras

Todos os dados das cidades consideradas foram obtidos em escala de 96 passos diários, ou seja, a cada 15 minutos. Esses passos são mais adequados para acomodação da tarifa branca e equivalem a um dinamismo maior de manutenção do conforto térmico. Para a escolha destas cidades, uma metodologia específica foi construída através da adoção de critérios para eleger cada uma das que representaria cada zona bioclimática.

Foram consideradas apenas cidades presentes na norma NBR 15220:3 (ABNT, 2005). A partir disso, foi montado um banco de dados acrescentando dados públicos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (IBGE, 2021) sobre a população registrada e densidade demográfica dessas cidades no último censo disponível, incluindo as regiões a que cada cidade pertence. Assim, para a seleção das cidades foram utilizados os seguintes critérios:

- Foi dada preferência inicial para escolhas de capitais como representantes de cada zona;
- A população foi um critério importante a ser considerado, assim cidades mais populosas foram preferidas;
- Buscou-se explorar bem o território, principalmente abrangendo ao menos uma cidade de cada uma das regiões (Norte, Nordeste, Centro-Oeste, Sul e Sudeste);
- Foi evitada a inclusão de cidades muito próximas, principalmente dentro de um mesmo estado ou unidade federativa;
- Buscou-se incluir mais cidades nas regiões mais populosas do país, como é o caso da região sudeste.

Mediante estes critérios, as cidades escolhidas ficaram com a numeração da sua respectiva zona bioclimática representada e comentários sobre cada cidade conforme segue:

1. Curitiba-PR (Zona Bioclimática 1) – a capital do Paraná está situada na zona bioclimática mais fria do Brasil, apresentando necessidade de aquecimento artificial e solar. Apenas aproximadamente 3,64% (12 cidades) das cidades da norma pertencem a esta zona;
2. Santa Maria-RS (Zona Bioclimática 2) – cidade escolhida do estado do Rio Grande do Sul, uma vez que sua capital Porto Alegre se encontra na mesma zona bioclimática que a cidade de São Paulo. Além disso, encontra-se em uma das latitudes mais altas do território brasileiro. Aproximados 10% (33 cidades) das cidades da norma pertencem a esta zona;

3. São Paulo-SP (Zona Bioclimática 3) – maior cidade do Brasil e da América Latina em termos populacionais. Portanto, deve ser considerada devido principalmente a esta particularidade. Aproximados 18,79% (62 cidades) das cidades da norma pertencem a esta zona;
4. Brasília-DF (Zona Bioclimática 4) – além de ser a capital do Brasil e estar na parte central do país, possui características climáticas diferenciadas no cerrado brasileiro. Além disso, possui uma população maior que outras capitais na mesma zona e tem a característica peculiar de baixa ou nula demanda de ar-condicionado. Apenas aproximadamente 5,15% (17 cidades) das cidades da norma pertencem a esta zona;
5. Governador Valadares-MG (Zona 5) – cidade que representa Minas Gerais, uma vez que Belo Horizonte encontra-se na mesma zona bioclimática que a cidade de São Paulo (Zona 3), Uberlândia na mesma que Brasília (Zona 4), a cidade possui mais que 263 mil habitantes e densidade demográfica de $112,58 \frac{hab}{km^2}$ e encontra-se na região Sudeste que é a mais populosa do país. O valor representante de cidades desta zona na norma é de aproximados 9,1% (30 cidades);
6. Campo Grande-MS (Zona Bioclimática 6) – embora Goiânia-GO seja a capital mais populosa desta zona bioclimática, muito próximo a esta cidade já está o Distrito Federal e a cidade de Brasília, já considerada. Mediante esse cenário, Campo Grande por ser capital de um estado foi a cidade escolhida para esta zona bioclimática específica. Cabe comentar que esta zona se encontra predominantemente na região Centro-Oeste do Brasil. O valor representante de cidades desta zona na norma é de aproximados 11,51% (38 cidades);
7. Teresina-PI (Zona Bioclimática 7) – possui mais de 814 mil habitantes e está localizada na região nordeste. O valor representante de cidades desta zona na norma é de aproximados 11,82% (39 cidades);
8. Manaus-AM (Zona Bioclimática 8) – apesar de Rio de Janeiro-RJ ser capital e a mais populosa do Brasil nesta zona, bem como outras capitais populosas, como Fortaleza-CE, João Pessoa-PB, Salvador-BA, Maceió-AL e Natal-RN, a cidade de Manaus foi escolhida por estar na região Norte. Tal região não havia sido contemplada, e ademais a maior proporção territorial desta zona no país está na região norte. Algumas capitais desta zona também estão na região Norte, mas Manaus supera a população dessas cidades, com 1.802.012 habitantes de acordo com último senso. Outro elemento interessante é a presença da floresta amazônica neste estado, o que acaba influenciando no microclima local. Destaca-se também que 30% (99 cidades) das cidades da norma estão nesta zona, sendo assim a mais representada.

Como trata-se de uma quantidade considerável de cidades, a apresentação de particularidades climáticas foi efetuada com base nos arquivos EPW dessas cidades provenientes da base do INMET que foi atualizada em 2018 e encontra-se disponível em LABEEE (2022b). Sendo assim, foi elaborado um sumário com as particularidades climáticas dividido em duas tabelas. A primeira contém região, latitude, longitude, ano do EPW, altitude e classificação de Köppen segundo Alvares et al. (2013) (Tabela 1). Já a segunda (Tabela 2) caracteriza as médias mensais máximas e mínimas de cada ano das temperaturas de bulbo seco (T_{BS}) e das umidades relativas (U_R) com a abreviatura do mês em que estes valores foram obtidos. Tais parâmetros foram obtidos por meio de análises diretamente executadas com os dados utilizados para as escolhas das cidades no *software* estatístico R (R Core Team, 2019).

Tabela 1 – Sumário de características climáticas das cidades consideradas: parte 1.

Zona	Cidade	UF	Região	Lat. [°]	Long. [°]	EPW [ano]	Altitude	Classif. Köppen
1	Curitiba	PR	Sul	-25,43	-49,27	2008	924	Cfb
2	Santa Maria	RS	Sul	-29,68	-53,81	2003	95	Cfa
3	São Paulo	SP	Sudeste	-23,85	-46,64	2008	792	Cfa
4	Brasília	DF	Centro-Oeste	-15,78	-47,93	2001	1160	Aw
5	Governador Valadares	MG	Sudeste	-18,85	-41,95	2009	263	Aw
6	Campo Grande	MS	Centro-Oeste	-20,44	-54,65	2008	530	Aw
7	Teresina	PI	Nordeste	-5,09	-42,8	2006	74	Aw
8	Manaus	AM	Norte	-3,1	-60,03	2008	67	Af

Tabela 2 – Sumário de características climáticas das cidades consideradas: parte 2.

Zona	Cidade	UF	T_{BS} mensal mín. [°C] (mês)	T_{BS} mensal máx. [°C] (mês)	U_R mensal mín. [%] (mês)	U_R mensal máx. [%] (mês)
1	Curitiba	PR	14.62 (set)	20.87 (fev)	71.1 (jul)	83.08 (jun)
2	Santa Maria	RS	13.42 (ago)	24.93 (jan)	68.95 (nov)	86.25 (jun)
3	São Paulo	SP	16.77 (jun)	22.35 (fev)	62.29 (jul)	75.78 (jan)
4	Brasília	DF	19.5 (jun)	22.42 (fev)	52.27 (ago)	79.21 (nov)
5	Governador Valadares	MG	21.01 (jul)	26.26 (fev)	65.3 (set)	81.32 (jan)
6	Campo Grande	MS	20.06 (mai)	25.38 (dez)	45.48 (jul)	81.31 (jan)
7	Teresina	PI	26.48 (fev)	29.32 (set)	48.83 (set)	83.43 (abr)
8	Manaus	AM	26.43 (abr)	28.97 (set)	70.06 (set)	86.15 (abr)

Por meio da observação da Tabela 2 percebe-se que as temperaturas mínimas e máximas seguem uma tendência de aumento da primeira até a última zona, com exceção de Teresina-PI (zona 7) que possui valores ligeiramente mais altos que Manaus-AM (zona 8).

De forma análoga, os dados considerados dos sites de postos tarifários e ranking das tarifas da ANEEL (ANEEL, 2021a; ANEEL, 2021b) foram organizados em duas tabelas, sendo que a primeira (Tabela 3) contém os valores tarifários na modalidade convencional e na tarifa horária branca, enquanto a segunda (Tabela 4) traz a resolução da ANEEL que vigorou as tarifações e postos, as concessionárias responsáveis por cada cidade e a configuração temporal dos postos tarifários com início e fim de cada bloco de preço.

Tabela 3 – Tarifas horária branca e convencional para cada cidade considerada.

Zona	Cidade	UF	Tarifa Conv. [R\$/kWh]	Ponta [R\$/kWh]	Intermed. [R\$/kWh]	Fora de Ponta [R\$/kWh]
1	Curitiba	PR	0,559	1	0,656	0,474
2	Santa Maria	RS	0,643	1.164	0,752	0,507
3	São Paulo	SP	0,594	1.115	0,724	0,499
4	Brasília	DF	0,575	0,985	0,653	0,492
5	Governador Valadares	MG	0,618	1,17	0,765	0,509
6	Campo Grande	MS	0,694	1.327	0,864	0,546
7	Teresina	PI	0,628	1.441	0,917	0,52
8	Manaus	AM	0,804	1.539	1.026	0,685

Tabela 4 – Resoluções ANEEL, concessionárias e configurações dos postos tarifários.

Zona	Cidade	UF	Resolução	Concessionária	Configuração dos postos tarifários					
					Intermed. 1		Ponta		Intermed. 2	
					Início	Fim	Início	Fim	Início	Fim
1	Curitiba	PR	2886/2021	Copel	17:00	18:00	18:00	21:00	21:00	22:00
2	Santa Maria	RS	2880/2021	RGE	16:00	18:00	18:00	21:00	21:00	22:00
3	São Paulo	SP	2890/2021	ENEL-SP	16:30	17:30	17:30	20:30	20:30	21:30
4	Brasília	DF	2985/2021	CEB	17:00	18:00	18:00	21:00	21:00	22:00
5	Governador Valadares	MG	2877/2021	CEMIG	16:00	17:00	17:00	20:00	20:00	21:00
6	Campo Grande	MS	2855/2021	EMS	15:30	17:30	17:30	20:30	20:30	21:30
7	Teresina	PI	2980/2021	Cepisa	16:30	17:30	17:30	20:30	20:30	21:30
8	Manaus	AM	2967/2021	AmE	19:00	20:00	20:00	23:00	23:00	00:00

Observando-se os valores tarifários da tarifa horária branca, nota-se que a cidade de Curitiba-PR possui os valores mais baixos em ambas as modalidades tarifárias, seguida pela cidade de São Paulo-SP. Por outro lado, a tarifação mais cara de todas foi a da cidade de Manaus-AM.

Nas oito cidades apresentadas foi priorizado refletir os dados de uso provenientes de [Eletrobrás \(2019\)](#), sem maior preocupação com a presença ou ausência dos moradores na residência, com o intuito de se aproximar da realidade obtida na pesquisa. Entretanto, no período noturno foi considerado que os equipamentos para a climatização da sala ou cozinha (cômodos desocupados) estariam desligados.

Os dias escolhidos para as cidades foram dois, um desfavorável ao aproveitamento da energia solar e outro favorável, denominados aqui, respectivamente como dia crítico negativo (dia 1) e dia crítico positivo (dia 2). As estratégias de climatização foram escolhidas de maneira conveniente com as estratégias apropriadas a cada zona bioclimática por meio da análise da carta nos respectivos anos dos arquivos EPW. Assim, todas as estratégias agrupadas aqui foram consideradas (PSV, VNT, RE, AQC e AC) em ao menos um dia de aplicação. Mais detalhes sobre os sistemas de aproveitamento solar (SAS e UFV), bateria residencial e aparelhos eletrodomésticos adotados serão apresentados nas seções seguintes.

Para obtenção das variáveis climáticas em passos de 15 minutos foi utilizado o *software EnergyPlus* ([NREL, 2017](#)) com o arquivo padrão “Minimal.idf” reconfigurado

para gerar as variáveis necessárias em quatro passos por hora. Os dados de saída do processo de simulação foram considerados para a rotulação das amostras climáticas com suas estratégias gerais e agrupadas bem como para efetuar o cálculo da geração fotovoltaica em cada passo de tempo.

3.6 Dimensionamento e Considerações sobre o Aproveitamento da Energia Solar

Para a geração fotovoltaica no passo de tempo ($E_{fv}^{(t)}$) com os dados de irradiação solar e da temperatura do ar se tornou possível simular a geração por meio matemático simplificado. Para os testes foi aplicado o modelo também utilizado por [Korkas et al. \(2016\)](#), que por sua vez consideraram o apresentado por [Tanaka et al. \(2012\)](#) para descrever a geração fotovoltaica diária nos períodos conforme [Equação 3.18](#):

$$E_{fv}^{(t)} = \eta \times S \times I_S^{(t)} \times [1 - 0.005(T_a^{(t)} - 25)] , \quad (3.18)$$

onde $E_{fv}^{(t)}$ é a energia média gerada em kWh em um determinado passo de tempo t , η é o rendimento do sistema fotovoltaico em *p.u.* (Por Unidade), S é a área ou superfície total dos painéis fotovoltaicos da usina em m^2 , I_S é a irradiação solar global para cada passo em $[\frac{kWh}{m^2}]$, e $T_a^{(t)}$ é a temperatura do ar externo em cada passo de tempo t em $[\text{°C}]$, numericamente igual a T_{BS} .

Percebe-se que para temperaturas maiores que 25 °C há uma perda na geração de 0,5% e caso a temperatura seja menor que isso, a geração é favorecida. Entretanto, a irradiação solar em cada passo de tempo acaba se tornando determinante. Com este modelo simplificado de estimativa de geração fotovoltaica, são calculadas a energia fotovoltaica em cada passo de tempo. Para o dimensionamento das instalações fotovoltaicas residenciais dessa tese foi considerado a utilização da [Equação 3.19](#) que segue:

$$P_{I_{fv}} = \frac{E_m}{30,4 \times I_p \times (1 - \frac{\rho\%}{100})} , \quad (3.19)$$

onde $P_{I_{fv}}$ é a potência do sistema a ser instalado em kWp, E_m é o consumo mensal considerado para o projeto, I_p é a irradiação total diária considerada de projeto em $[\frac{kWh}{m^2.dia}]$, sendo nesse caso obtido de sites de meteorologia ou diretamente pelo arquivo EPW, a constante $\rho\%$ representa o rendimento global da UFV de microgeração e por fim a constante de “30,4” refere-se a média de dias no mês, sendo igual ao número de dias no ano dividido pelo número de meses, ou seja, equivale a 365 dividido por 12.

Com essa metodologia para estimação da geração fotovoltaica, bem como de dimensionamento de cada UFV de microgeração residencial foi possível fazer a parte de aproveitamento fotovoltaico em todos os testes.

O dimensionamento do SAS foi baseado na NBR 15569 (ABNT, 2021) para sistemas residenciais unifamiliares em circuito direto. Essa norma direciona o dimensionamento por dois métodos. O primeiro método recomendado é o uma simplificação da carta F de autoria de Beckman, Klein e Duffie (1977). O segundo método, mais atual e adotado para esta tese, inicia-se com o cálculo do volume de consumo da água quente, dado pela Equação 3.20:

$$V_c = \sum (Q_u \times T_u \times f_u) , \quad (3.20)$$

onde V_c é consumo diário total de água quente na residência expresso em litros (L), Q_u é a vazão de utilização do aparelho consumidor de água quente expresso em litros por minuto (L/min), T_u é o tempo de uso médio diário do aparelho, expresso em minutos (min) e f_u é a frequência de uso de um aparelho consumidor de água em $[vezes/dia]$.

O próximo procedimento de cálculo consiste em determinar o volume de armazenamento. A norma recomenda que este volume seja maior ou igual que 75% do volume de consumo. Entretanto, na aplicação deste trabalho foi considerado que o volume de consumo seria igual ao volume de armazenamento ($V_c = V_{arm}$), o que dispensa um equacionamento que é função da temperatura de armazenamento e da temperatura ambiente. Dessa forma, a água aquecida pelos coletores solares será capaz de suprir toda a necessidade de água quente do dia seguinte. Por outro lado, quando ocorrer a indisponibilidade de energia solar, o sistema auxiliar do *boiler* consumirá mais energia elétrica.

Posteriormente se torna necessário calcular a energia útil (E_u) que, conforme a própria norma (ABNT, 2021), é “a energia que, de maneira efetiva, se aproveita em um processo para incrementar a temperatura de um fluido de trabalho, depois de converter a energia solar disponível em energia térmica”, sendo dada em quilowatt-hora por mês ($kWh/mês$) e calculada pela Equação 3.21:

$$E_u = \frac{V_{arm} \times \rho_a \times C_p \times (T_{arm} - T_{amb})}{3600} \times 30 \text{ dias} , \quad (3.21)$$

onde E_u é a energia útil, expressa em quilowatt-hora por mês ($kWh/mês$), V_{arm} é o volume de armazenamento do reservatório em litros (L), ρ_a é a massa específica da água igual a 1, expressa em quilogramas por litro (kg/L), C_p é calor específico da água igual a 4,18 e é expresso em quilojoules por quilograma grau Celsius ($kJ/kg.^{\circ}C$), T_{arm} é a temperatura de armazenamento da água, expressa em graus Celsius ($^{\circ}C$) e T_{amb} é a temperatura ambiente média anual do local de instalação, expressa em graus Celsius ($^{\circ}C$).

Após a determinação da energia útil (E_u), o processo continua com o cálculo da área necessária de coletores solares. Entretanto, para tal cálculo, é necessário calcular um fator de correção da instalação da área coletora para a inclinação e orientação dos coletores por meio da Equação 3.22:

$$FC_{inst} = \frac{1}{1 - [1,2 \times 10^{-4} \times (\beta_c - \beta_o)^2 + 3,5 \times 10^{-5} \times \gamma^2]} \quad (3.22)$$

(para $15^\circ < \beta < 90^\circ$),

onde FC_{inst} é o fator de correção para inclinação e orientação do coletor, β_c é a inclinação do coletor em relação ao plano horizontal e expressa em graus ($^\circ$), β_o é a inclinação ótima do coletor para o local de instalação e expressa em graus ($^\circ$) sendo recomendado adotar o ângulo do valor de módulo da latitude local acrescido de 10° e γ é o ângulo de orientação dos coletores solares em relação ao norte geográfico, expresso em graus ($^\circ$).

Observando a expressão 3.22, se o projetista considerar a inclinação igual ao β_o recomendado e a orientação dos coletores exatamente para o norte geográfico, o valor resultante de FC_{inst} será igual a 1. Sendo a residência considerada bioclimática, convém também que a inclinação e orientação de seu telhado seja adequado ou adaptado por suportes para que o aproveitamento seja o mais eficiente possível, com a casa produzida de maneira sustentável. Ademais, o aproveitamento solar aqui considerado será apenas o efetivamente necessário para as residências, de tal modo que provavelmente haveria espaço no telhado para este SAS e para a UFV de microgeração.

Finalmente, a área total dos coletores solares do SAS deve ser determinada por meio da Equação 3.23:

$$A_c = \frac{(E_u + E_p) \times FC_{inst} \times 4,89}{P_{MEE} \times I_G}, \quad (3.23)$$

onde A_c é a área coletora sendo expressa em metros quadrados (m^2), I_G é o valor da irradiação global média anual diária para o local de instalação sendo expresso em quilowatts hora por metro quadrado dia ($kWh/m^2.dia$), P_{MEE} é a produção média mensal de energia específica do coletor solar sendo expressa em quilowatts hora por mês por metro quadrado ($kWh/mês.m^2$) e este valor pode ser obtido na tabela de eficiência energética do INMETRO, E_u é a energia útil em quilowatts hora por mês ($kWh/mês$) e finalmente E_p é o somatório das perdas térmicas dos circuitos primário e secundário sendo expresso em quilowatts hora por mês ($kWh/mês$) e calculado pela soma das perdas ou considerando 15% da E_u ($E_p = 0,15 \times E_u$).

Considerando o FC_{inst} como unitário e substituindo E_p por $0,15 \times E_u$, obtêm-se a expressão de cálculo da área coletora simplificado na Equação 3.24:

$$A_c = \frac{5,6235 \times E_u}{P_{MEE} \times I_G}, \quad (3.24)$$

sendo a constante 5,6235 resultado do produto entre 1,15 e a constante de 4,89 e esta foi a equação aplicada no dimensionamento do SAS deste trabalho.

De posse dos dados de irradiação solar global durante o dia, torna-se possível estimar se a energia solar térmica seria suficiente ou não para aquecer a água do dia seguinte para as habitações. Com isso, determinar se a variável binária σ seria igual a 0 caso a energia solar térmica seja suficiente e igual a 1 caso seja insuficiente, fazendo com

que o *boiler* seja ligado. Conforme já mencionado, a irradiação solar global média anual que pode ser a I_G considerada no projeto do SAS sendo ao mesmo tempo considerado para I_p no projeto da UFV (portanto $I_G = I_p$). Aproveitando este valor comum de referência, a regra para o parâmetro de uso do aquecedor elétrico do *boiler* foi construída e é expressa na [Equação 3.25](#):

$$\sigma = \begin{cases} 1, & \text{Se } I_{T_{dia}} < I_G \\ 0, & \text{Se } I_{T_{dia}} \geq I_G \end{cases} \quad (3.25)$$

Salienta-se que $I_{T_{dia}}$ é a irradiação solar total no dia considerado e se de fato for maior ou igual ao valor adotado no projeto os sistemas, em tese, estes sistemas deveriam funcionar adequadamente para aquecer a água (SAS) e gerar a eletricidade para o dia de consumo médio mensal (UFV).

Caso o aquecedor elétrico do *boiler* necessite ser acionado se estabelecerá como uma carga flexível do tipo não-interrompível (*NI*), por ser ineficiente fracionar o aquecimento total do reservatório, e poderá ter sua ligação iniciada a qualquer hora do dia, desde que seja possível ligá-lo por todo tempo de uso.

Desse modo, a mesma regra expressa na [Equação 3.25](#) foi adotada para determinar se o aquecimento solar passivo ou em conjunto com a inércia térmica da residência seria suficiente naquele dia. Caso positivo, nas horas com disponibilidade de radiação solar dentro da residência a climatização seria considerada como passiva. Esta simplificação se torna necessária, uma vez que para a determinação assertiva de que a radiação solar seria suficiente para a manutenção do conforto térmico caberia, então, deter conhecimento dos parâmetros da edificação que aqui, por simplicidade e redução do escopo, foi considerada adequadamente projetada e concebida de maneira bioclimática.

Assim, o equacionamento do aproveitamento abrangente da energia solar está posto e a seguir os parâmetros e dimensionamentos de quaisquer aproveitamentos solares envolvidos são apresentados para as oito cidades escolhidas.

3.6.1 Aproveitamento Solar na Aplicação em 24 Passos de Tempo

Para a aplicação em 24 passos de tempo na cidade de Brasília-DF, apesar de envolver apenas a aplicação de UFV de microgeração residencial, suas considerações foram encaminhadas a uma aproximação com a realidade. Nesse sentido o valor do consumo mensal de eletricidade da residência típica foi o maior obtido para o Distrito Federal ([ELETROBRÁS, 2019](#)), no valor de E_m 164,41 kWh.

Nesse dimensionamento, não foi abatido o custo de disponibilidade, consumo obrigatório a ser pago pelo gerador distribuído, uma vez que o sistema foi dimensionado para que a residência fosse uma residência quase zero em consumo de energia (nZEB) e

pudesse aproveitar ao máximo sua geração local.

A radiação solar de projeto I_P foi obtido através da extração de valor de referência do portal CRESESB (Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito) (CEPEL; ELETROBRÁS, 2021), uma prática corriqueira dos projetistas de instalações fotovoltaicas. O valor de radiação de referência de radiação total diária foi obtido com a latitude e longitude do local (15,801°S; 47,949°O), neste caso foi de 5,45 $kWh/m^2.dia$, considerando o ângulo de inclinação igual ao da latitude.

Para a placa fotovoltaica foi considerado um fabricante nacional Globo Brasil™, modelo GBR330p que possui rendimento exato de 17%, sendo este também considerado como rendimento do modelo de geração (η). Os dados da placa encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros do painel fotovoltaico considerado na aplicação em 24 passos de tempo.

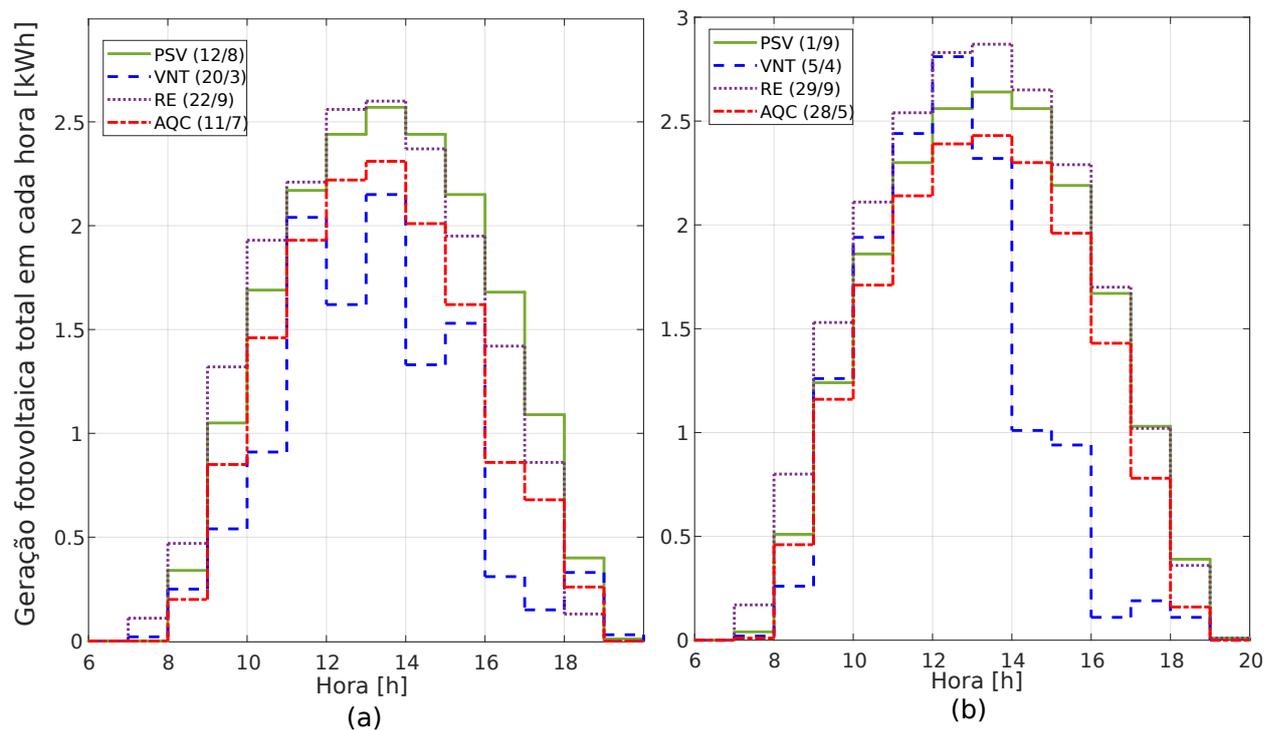
Especificação	Valor	Unidade
Potência nominal ($P_{m\acute{a}x}$)	330	Wp
Tensão de operação DC (VMP-DC)	37,18	V
Corrente de operação DC (VMP-DC)	8,9	A
Tensão de circuito aberto DC (VOC-DC)	45,22	V
Corrente de Curto-Circuito (I_{sc})	9,31	A
Eficiência do módulo	17	%
Temperatura de operação	-40 a 85	° C
Tolerância de potência	0 \sim +5	W
Altura do módulo	1,956	m
Comprimento do módulo	0,992	m

Com a expressão Equação 3.19 foi encontrado o valor de 1,1956 kWp que foi arredondado para 1,2 kWp e com as dimensões da placa e área da mesma como 1,94 m^2 a quantidade de placas necessária seria de 3,63 placas, o que foi arredondado para 4 placas resultando em uma área da UFV (S) de 7,76 m^2 . Portanto todos os parâmetros necessários para a estimativa da geração fotovoltaica foram determinados faltando apenas a inserção das variáveis de radiação solar a cada passo do dia ($I_S^{(t)}$), neste caso horário, bem como a temperatura do ar ($T_a^{(t)}$) no mesmo passo.

Para o resultado da descrição da geração fotovoltaica foram considerados os dois anos (2019 e 2020), sendo 4 dias para cada ano, contendo um dia cuja uma estratégia dentre as quatro possíveis nestes anos (PSV, VNT, RE e AQC). Sendo assim foi elaborada a Figura 15 com os detalhes da geração fotovoltaica dos dois anos na mesma ilustração, para que os gráficos fossem acomodados lado a lado, foi considerado no eixo das horas apenas o intervalo das 06:00 às 19:00 horas, sendo este o período de produção de energia fotovoltaica no dia.

Pela análise da Figura 15 é possível perceber que praticamente todos os dias apresentaram resultados de geração fotovoltaica positivo, diante dessa observação foi vislumbrado analisar o escalonamento em dias críticos de presença e ausência de recursos

Figura 15 – Descrição da geração fotovoltaica nos dias de 2019(a) e 2020(b) para a aplicação em 24 passos de tempo.



Fonte:Elaborado pelo Autor(2021).

solares. Sendo assim, estas considerações foram inseridas nas aplicações de 96 passos de tempo para cada uma das oito cidades nas zonas bioclimáticas brasileiras.

3.6.2 Aproveitamento Solar nas Aplicações em 96 Passos de Tempo

Nessa aplicação o aproveitamento de energia solar será o mais abrangente o possível, uma vez que dentre as aplicações haverá dias com aproveitamento de energia solar para aquecimento ambiental, geração fotovoltaica e aquecimento da água isolados ou simultaneamente. Para o dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos foram considerados dados do mês de maior consumo do PPH-2019 (ELETROBRÁS, 2019) para o E_m de cada cidade. A radiação de projeto I_p tanto para a UFV como para o SAS foi a média calculada diretamente dos dados extraídos do arquivo EPW, para as perdas do sistema (ρ_5) foi considerado a taxa típica de 20%. A placa considerada foi da fabricante Canadian modelo CS3W de 400 Wp conforme Tabela 6.

De posse do valor de E_m , I_p e ρ_5 a potência de cada UFV de microgeração (P_{UFV}) de cada cidade foi calculada pela expressão Equação 3.19 em W que foi arredondado e passado a kW. Com a potência dos módulos foi calculado o número de placas que seria necessário e este valor arredondado ao número inteiro maior mais próximo que ficou como

Tabela 6 – Parâmetros do painel fotovoltaico considerado nas aplicações em 96 passos de tempo.

Especificação	Valor	Unidade
Potência nominal (P _{máx})	400	Wp
Tensão de operação DC (VMP-DC)	38,7	V
Corrente de operação DC (VMP-DC)	10,34	A
Tensão de circuito aberto DC (VOC-DC)	47,2	V
Corrente de Curto-Circuito (I _{sc})	10,90	A
Eficiência do módulo	18,1	%
Temperatura de operação	-40 a 85	° C
Tolerância de potência	0 \sim +10	W
Altura do módulo	2.105	mm
Comprimento do módulo	1.048	m

o adotado. Com a altura e largura do painel tem-se sua área e multiplicando pelo número de painéis adotados obtêm-se a superfície total da UFV (S). Neste sentido, a [Tabela 6](#) apresenta os valores das variáveis envolvidas para cada cidade e a área das respectivas centrais de microgeração.

Tabela 7 – Parâmetros e resultados de dimensionamento das UFVs das oito cidades.

Especificação	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Zona 7	Zona 8	Unidades
Cidades	Curitiba (PR)	Santa Maria (RS)	São Paulo (SP)	Brasília (DF)	Governador Valadares (MG)	Campo Grande (MS)	Teresina (PI)	Manaus (AM)	-
Ano do EPW	2008	2003	2008	2001	2009	2008	2006	2008	EPW
E_m (PPH 2019)	182,69	229,49	184,44	164,41	140,8	213,62	158,68	150,55	[kWh]
I_p (projeto)	4,084	4,292	4,023	5,052	5,03	4,966	5,679	4,715	[kWh/m ² .dia]
$\rho\%$	20	20	20	20	20	20	20	20	%
$P_{I_{FV}}$ calculada	1839,35	2198,57	1885,13	1338,14	1150,99	1768,77	1148,91	1312,91	[Wpico]
$P_{I_{FV}}$ adotada	1,84	2,2	1,89	1,34	1,16	1,77	1,15	1,32	[kWpico]
Potência do módulo	400	400	400	400	400	400	400	400	[Wpico]
N° de módulos calculado	4,6	5,5	4,725	3,35	2,9	4,425	2,875	3,3	[placas]
N° de módulos adotado	5	6	5	4	3	5	3	4	[placas]
Altura do painel	2.105	2.105	2.105	2.105	2.105	2.105	2.105	2.105	[mm]
Largura do painel	1.048	1.048	1.048	1.048	1.048	1.048	1.048	1.048	[mm]
S do painel	2,21	2,21	2,21	2,21	2,21	2,21	2,21	2,21	[m ²]
S da UFV	11,05	13,26	11,05	8,84	6,63	11,05	6,63	8,84	[m ²]

A partir da observação dos resultados da superfície de placas total de cada UFV nota-se que são todas singelas, com no máximo seis placas. Nas cidades de Governador Valadares-MG e Teresina-PI foram encontrados os menores valores de S . Evidentemente tal tamanho de UFV condiz com a combinação de baixo consumo mensal médio adotado (E_m) e as duas maiores irradiações globais diárias médias (I_p) serem dos arquivos EPW dessas cidades. Cabe destacar que por simplicidade foi considerada esta potência em kWp como a potência para a entrada no modelo de geração, sem entrar no mérito do inversor utilizado. Ademais, atualmente os microinversores fotovoltaicos podem ser aplicados a apenas uma placa ou a um número reduzido delas como é o caso do estudo de caso relatado por [Choque et al. \(2020\)](#).

O aproveitamento da energia solar térmica através do SAS deve ser precedido pelo cálculo do consumo de água por pessoa e, para tal, foi considerado o número de pessoas residentes para cada residência do estado que cada cidade estudada pertence no PPH-2019 ([ELETROBRÁS, 2019](#)), com o valor de moradores arredondados para o valor inteiro maior

mais próximo. A água quente foi considerada para três funções: banho, lavatório e lavagem de louças. Os valores típicos de vazões por minuto e frequência de uso foram extraídos do Anexo C e do exemplo de dimensionamento do Anexo B da NBR 15569 (ABNT, 2021), priorizando os valores de consumo mínimo e arredondando valores fracionados.

A sequência de cálculo se inicia com a determinação do volume de água em litros de cada aparelho de uso na residência, sendo da ducha e do lavatório do banheiro, depois passa pelo cálculo do volume da cozinha considerando apenas sua torneira, destacando que sempre f_u é a frequência de uso por pessoa e posteriormente foi totalizado o valor de cada um dos dois cômodos. Cabe comentar que para ducha higiênica ou lavatório os mesmos valores das variáveis seriam adotados, sendo assim o volume calculado atenderia ao uso de um dos dois dispositivos com água quente. Para evidenciar o processo de cálculo para as cidades, a Tabela 8 mostra todas as variáveis e parâmetros adotados até o resultado de volume de consumo de cada residência.

Tabela 8 – Parâmetros e resultados do cálculo de volume de água quente nas oito cidades.

Especificação	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Zona 7	Zona 8	Unidades
Cidade	Curitiba (PR)	Santa Maria (RS)	São Paulo (SP)	Brasília (DF)	Governador Valadares (MG)	Campo Grande (MS)	Teresina (PI)	Manaus (AM)	-
Pessoas na habitação	4	4	4	4	4	5	5	5	[pessoas]
Q_u ducha de banho	3	3	3	3	3	3	3	3	[L/min]
T_u banho por pessoa	10	10	10	10	10	10	10	10	[min/pessoa]
f_u de banhos	2	2	2	2	2	2	2	2	[banhos/dia]
V_c da ducha de banho	240	240	240	240	240	300	300	300	[L]
Q_u do lavatório	3	3	3	3	3	3	3	3	[L/min]
T_u de lavatório por pessoa	3	3	3	3	3	3	3	3	[min]
f_u do lavatório por pessoa	2	2	2	2	2	2	2	2	[usos/dia]
V_c do lavatório	24	24	24	24	24	30	30	30	[L]
V_c do banheiro	264	264	264	264	264	330	330	330	[L]
T_u pia de cozinha	3	3	3	3	3	3	3	3	[min/pessoa]
Q_u individual da torneira	3	3	3	3	3	3	3	3	[L/min]
f_u da torneira por pessoa	2	2	2	2	2	2	2	2	[uso/pessoa]
V_c total torneira	72	72	72	72	72	90	90	90	[L]
V_c diário da cozinha	72	72	72	72	72	90	90	90	[L]
f_u de lavagens por dia	2	2	2	2	2	2	2	1	[lavagem/dia]
V_c total da residência	336	336	336	336	336	420	420	420	[L]

Na referida Tabela 9 observa-se que o fator preponderante foi o número de habitantes na casa que para as cidades de Campo Grande-MS, Teresina-PI e Manaus-AM foram em média de cinco pessoas por residência (ELETROBRÁS, 2019), até mesmo porque foi a única variável de entrada modificada nos cálculos. Os valores obtidos foram idênticos para estas três cidades (420 litros, nas zonas 6 a 8) e um valor menor foi obtido para as demais cidades em estudo (336 litros, nas zonas 1 a 5).

De posse dos volumes considerados foi buscado um reservatório comercial que pudesse atender as necessidades calculadas, o critério de escolha foi tentar manter o fabricante e linha de produto para os dois reservatórios. Foi desejado então que o produto tivesse o Selo PROCEL (Programa Nacional de Conservação da Energia Elétrica) de eficiência energética, ou seja, estivesse entre os mais eficientes de sua categoria. Sendo assim, foi consultado o site do Selo PROCEL (PROCEL, 2021b) e baixado o documento específico de reservatório térmico de SAS e escolhido o fabricante internacional BOSCH™ e

sua linha Heliotek, modelos MK400 de 400 litros (zonas 1 a 5) e MK500 de 500 litros (zonas 6 a 8).

Cabe comentar que a potência elétrica nominal do aquecimento elétrico dos reservatórios adotados é a mesma (2,5kW). A partir de valores típicos de Niskier e Macintyre (2008), em que a taxa de aquecimento seria de 200 *L/hora*, foi considerada uma média de tempo de 50 litros por passo de tempo, sendo assim seriam necessários 8 passos de tempo de 15 minutos para o reservatório de 400 litros e 10 passos para o de 500 litros.

Para o cálculo da área coletora de energia solar térmica foi considerado o volume comercial como volume de armazenamento de água quente para o dimensionamento do SAS, haja vista que garantiria maiores níveis de consumo de água quente que o estimado. A temperatura de armazenamento T_{arm} considerada foi de 50°C e a temperatura ambiente média anual T_{amb} foi calculada para cada EPW. Os coletores considerados foram do fabricante Soletrol com registro no Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) 003661/2019, linha Soletrol Max de cobre e área nominal de 2 m² com área efetiva de 2,04 m² e P_{MEE} de 165,82 *kWh/mês*.

Sendo assim, com os valores considerados e as simplificações que levaram até a [Equação 3.24](#) foi concebida a [Tabela 9](#) que demonstra os cálculos envolvidos e as obtenções das configurações dos coletores do SAS. Nota-se pela tabela apresentada que não mais que dois coletores foram necessários para cada residência, com destaque para Teresina-PI em que apenas um coletor foi necessário devido principalmente a alto valor de I_G obtido do EPW.

Embora o SAS em dia com menor irradiação que a de projeto possa contribuir com o aquecimento auxiliar, tal contribuição foi desprezada uma vez que extremos mais baixos de irradiação global diária foram buscados para os dias críticos negativos para cada cidade considerada.

Tabela 9 – Parâmetros e resultados do cálculo do SAS nas oito cidades.

Especificação	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Zona 7	Zona 8
Cidades	Curitiba (PR)	Santa Maria (RS)	São Paulo (SP)	Brasília (DF)	Governador Valadares (MG)	Campo Grande (MS)	Teresina (PI)	Manaus (AM)
Volume de consumo [L]	344	344	344	344	344	428	428	428
Volume comercial do reservatório [L]	400	400	400	400	400	500	500	500
Especificação do reservatório [marca e modelo]	BOSCH HELIOTEK MK400	BOSCH HELIOTEK MK500	BOSCH HELIOTEK MK500	BOSCH HELIOTEK MK500				
ρ da água [kg/L]	1	1	1	1	1	1	1	1
C_p da água [kJ/kg.°C]	4,18	4,18	4,18	4,18	4,18	4,18	4,18	4,18
T_{arm} [°C]	50	50	50	50	50	50	50	50
T_{amb} [°C]	17,38	19,04	19,57	21,08	24,03	23,45	27,69	27,28
E_u [kWh/mês]	390,87	370,98336	364,63255	346,5387	311,1898533	395,8251	332,61235	338,724907
E_{perdas} [kWh]	58,63119	55,647504	54,694882	51,98081	46,678478	59,373765	49,891853	50,808736
P_{MEE} [kWh/m ² .dia]	165,82	165,82	165,82	165,82	165,82	165,82	165,82	165,82
I_G [kWh.m ² .dia]	4,084	4,292	4,023	5,052	5,03	4,966	5,679	4,715
A_c necessária [m ²]	3,25	2,93	3,07	2,33	2,1	2,7	1,99	2,44
Altura do coletor [m]	1,008	1,008	1,008	1,008	1,008	1,008	1,008	1,008
Largura do coletor [m]	2,022	2,022	2,022	2,022	2,022	2,022	2,022	2,022
Área do painel [m ²]	2,04	2,04	2,04	2,04	2,04	2,04	2,04	2,04
Nº de coletores calculados	1,59	1,44	1,5	1,14	1,03	1,32	0,98	1,2
Nº coletores adotados	2	2	2	2	2	2	1	2
A_c do SAS [m ²]	4,08	4,08	4,08	4,08	4,08	4,08	2,04	4,08

3.7 Considerações Sobre a Bateria Residencial

Segundo [Fitzpatrick e Tsang \(2015\)](#) as baterias são classificadas em duas categorias principais, as primárias que são aquelas que só podem ser descarregadas e as secundárias que podem ser carregadas e descarregadas. Em um contexto de redes elétricas inteligentes, as secundárias são as consideradas devido a dinâmica de interação com a rede que ela propicia, possibilitando até mesmo o auxílio da manutenção da qualidade de tensão das redes, sendo carregada na ocorrência de sobretensão e descarregadas durante subtensões. Isso posto, é de suma importância considerar uma bateria como dispositivo de armazenamento energético para um melhor aproveitamento da geração fotovoltaica e nos momentos de baixo preço na tarifa de energia elétrica e, por isto, ela está presente em todos os testes desta pesquisa no cenário inteligente e sustentável.

A bateria considerada neste trabalho teve como referência inicial os valores adotados por [Cavalcá \(2018\)](#), entretanto notou-se que a capacidade de armazenamento era muito elevada para aplicação em uma residência unifamiliar e também muito acima dos padrões comercialmente encontrados. A partir disto, foi iniciada uma busca por um modelo comercial disponível no Brasil que pudesse ser aplicado em uma residência neste estudo. Nesse processo, foi encontrado o fabricante BYD™ (*Build Your Dreams*) que possui banco de baterias de Lítio Ferro Fosfato (LiFePO₄) para uso *ongrid* B-Box LV com capacidade de

armazenamento de 3,5 kWh por unidade e pode associar até em quatro módulos idênticos obtendo a capacidade de 14 kWh.

Os dados da bateria B-Box LV de 3,5 kWh foram extraídos da documentação do fabricante (BYD-BRASIL, 2021). Os parâmetros adicionais foram buscados nos manuais do fabricante, onde consta que no armazenamento (quando a bateria não está sendo utilizada) seu EDC deve ficar entre 30 e 60% (0,3 a 0,6 p.u.). Assim, o valor de EDC_{min} foi mantido. Já o EDC_{max} foi ajustado para 90% (0,9 p.u.), sendo este um valor típico aplicável, uma vez que não faria sentido usar apenas 60% da capacidade da bateria. Os dados são sumarizados na Tabela 10.

Tabela 10 – Parâmetros da bateria residencial para aplicações em 24 em 96 passos de tempo.

Especificação	Valor	Unidade
Quantidade máxima de carga (E_{max}^{cg}) e descarga (E_{max}^{deg}) em 1h	3	kWh
Rendimento de carga (η^{cg}) e descarga (η^{deg})	0,953	p.u.
Máximo estado de carga (EDC_{max})	0,3	p.u.
Mínimo estado de carga (EDC_{min})	0,9	p.u.
Capacidade da bateria (C_{bat})	3,5	kWh

Tratando-se da aplicação em passos de 15 minutos (96 passos no dia) foi considerado que os valores de capacidade de bateria e quantidades de carga fosse de 1/4 dos valores nominais de tal forma que a bateria se comportasse distribuindo suas capacidades dentro do tempo nominal de uma hora. Ademais, buscou-se com o fabricante se a bateria poderia ser submetida a ciclos mais rigorosos, visto que em 5 segundos ela poderia fornecer um pico de saída de 5 kWh (BYD-BRASIL, 2021). Diante da ausência de resposta, a fragmentação das capacidades foi mantida.

3.8 Parâmetros dos Eletrodomésticos e Equipamentos de Climatização

O PPH-2019 foi utilizado para parametrizar as cargas residenciais, uma vez que ele possui um sumário executivo nacional e um relatório para cada unidade federativa do Brasil (ELETROBRÁS, 2019). Nas seguintes subseções são apresentados os parâmetros adotados. Outro conteúdo evidenciado foi relativo aos equipamentos considerados para a manutenção do conforto térmico que foram selecionados separadamente para a entrada no escalonamento como imposições.

3.8.1 Eletrodomésticos para Aplicação em 24 Passos de Tempo

Nas primeiras aplicações desta pesquisa foi efetuada uma análise minuciosa no relatório do PPH-2019 (ELETROBRÁS, 2019) com enfoque nos dados do Distrito Federal com 625 residências participantes da pesquisa, dentro do qual se localiza a cidade de Brasília. Os eletrodomésticos presentes no relatório foram analisados um a um para verificar qual entraria na lista de eletrodomésticos da residência típica considerando o percentual de residências que possuíam cada um dos aparelhos do relatório e a frequência de uso, sendo assim seria necessário combinar os dois parâmetros para inclusão no modelo. Ressalta-se que na casa considerada a família seria composta por um casal com um filho.

Para o consumo dos equipamentos foi considerado um endereço eletrônico da PROCEL INFO que possui o consumo mensal médio dos aparelhos, a média de utilização em horas ou minutos por dia e o número de dias de uso por mês (PROCEL, 2021a).

A partir dos valores desse site, foi possível estimar o consumo de um equipamento na janela de uma hora mais próximo da realidade, por exemplo, um liquidificador é utilizado 15 minutos por dia e 15 dias por mês. Com seu consumo total no mês de 0,8 kWh se torna possível descobrir que cada utilização dele em um dia demanda um consumo de 53,33 Wh ($800 \div 15$) e sendo seu tempo de uso menor que o passo de tempo será este o valor escalonado e não o valor de sua potência nominal, como efetuado por pesquisas similares (CAVALCA, 2018; HUANG; TIAN; WANG, 2015; FONSECA et al., 2020).

Sendo assim ao invés da coluna potência foi inserida a coluna de consumo total dentro de cada hora dos equipamentos, sendo mais condizente com a realidade, afinal não seria normal utilizar um liquidificador por uma hora inteira. Dessa maneira, a Tabela 11 apresenta os valores e parâmetros adotados para o escalonamento dos eletrodomésticos.

Considerando uma ocupação permanente na residência no ano de 2020 a Tabela 12 traz a parametrização modificada devido a situação da pandemia de COVID-19, onde o trabalho dos pais e a educação do filho passaram a ocorrer de maneira remota ou virtual.

Por um lado, a parametrização dos equipamentos para a análise no ano de 2019, sem a pandemia de COVID-19, foi aproximado ao máximo da realidade presente no PPH-2019 (ELETROBRÁS, 2019). Por outro lado, para o ano de 2020 foram adicionados eletrodomésticos de duas estações de trabalho completas que seriam utilizados pelos adultos da casa para trabalho remoto, com a flexibilidade dessa modalidade seu início ou fim podem variar, mas foram considerados não interrompíveis e em dois turnos diários de trabalho. Essas duas estações foram lançadas duas vezes no mecanismo de escalonamento e por isso identificadas com códigos “a” para uso no período matutino e “b” no período vespertino, ambos como cargas não interrompíveis (*NI*) e algumas cargas foram consideradas fixas (*F*), como é o caso da Geladeira, do modem de internet e de algumas lâmpadas.

Tabela 11 – Parâmetros de eletrodomésticos na aplicação de 24 passos - ano de 2019.

Eletrodomésticos	Tipo	Início do intervalo de uso (α_{ap})	Final do intervalo de uso (β_{ap})	Consumo horário (Wh)	Duração [h]
Lâmpada fluorescente compacta 1	<i>F</i>	18	22	25	5
Chuveiro elétrico	<i>I</i>	13	24	750	3
Chapinha	<i>I</i>	13	24	24	1
Lâmpada LED 1	<i>I</i>	18	24	12	1
Modem de Internet	<i>F</i>	1	24	8	24
Celular	<i>NI</i>	19	23	17	2
Computador de mesa	<i>I</i>	13	24	63	3
Lâmpada LED 2	<i>I</i>	18	24	12	1
Celular	<i>NI</i>	19	23	17	2
Lâmpada fluorescente compacta 2	<i>F</i>	19	22	25	4
Geladeira	<i>F</i>	1	24	79	24
Liquidificador	<i>I</i>	13	24	35	1
Forno micro-ondas	<i>I</i>	13	24	241	1
Forno elétrico	<i>I</i>	18	22	125	1
Lâmpada fluorescente compacta 3	<i>I</i>	18	24	25	4
TV	<i>I</i>	13	24	83	4
Blu-ray	<i>I</i>	13	24	15	2
Lâmpada fluorescente compacta 4	<i>I</i>	18	24	25	1
Ferro de passar	<i>I</i>	13	22	525	1
Máquina de lavar roupas	<i>I</i>	8	22	147	2

Tabela 12 – Parâmetros de eletrodomésticos na aplicação de 24 passos - ano de 2020.

Eletrodomésticos	Tipo	Início do intervalo de uso (α_{ap})	Final do intervalo de uso (β_{ap})	Consumo horário (Wh)	Duração [h]
Lâmpada fluorescente compacta 1	<i>F</i>	20	22	25	3
Chuveiro elétrico	<i>I</i>	6	24	750	3
Chapinha	<i>I</i>	6	24	24	1
Lâmpada LED 1	<i>I</i>	18	24	12	1
Modem de Internet	<i>F</i>	1	24	8	24
Celular	<i>NI</i>	19	23	17	2
Computador de mesa	<i>F</i>	8	12	63	5
Computador de mesa	<i>I</i>	13	24	63	3
Lâmpada LED 2	<i>I</i>	18	24	12	1
Celular	<i>NI</i>	19	23	17	2
Estação de trabalho 1-a	<i>NI</i>	8	14	118	4
Estação de trabalho 2-a	<i>NI</i>	8	14	118	4
Estação de trabalho 1-b	<i>NI</i>	15	20	118	4
Estação de trabalho 2-b	<i>NI</i>	15	20	118	4
Lâmpada fluorescente compacta 2	<i>F</i>	19	22	25	4
Geladeira	<i>F</i>	1	24	79	24
Liquidificador	<i>I</i>	6	24	35	1
Forno micro-ondas	<i>I</i>	6	24	241	1
Forno elétrico	<i>I</i>	18	22	125	1
Lâmpada fluorescente compacta 3	<i>I</i>	18	24	25	4
TV	<i>I</i>	8	24	83	4
Blu-ray	<i>I</i>	8	24	15	2
Lâmpada fluorescente compacta 4	<i>I</i>	18	24	25	1
Ferro de passar	<i>I</i>	10	22	525	1
Máquina de lavar roupas	<i>I</i>	8	22	147	2

Outra modificação evidente na [Tabela 12](#) é a presença do computador duas vezes na lista de parametrização de escalonamento, sendo que uma vez está como carga fixa (F). Isto porque o mesmo computador de mesa foi considerado também como instrumento da educação virtual do filho do casal.

A casa considerada nesta aplicação é composta por dois quartos, um banheiro e uma sala-cozinha e seu projeto foi considerado adequado para que a climatização seja adequada por meio das diferentes estratégias de climatização. Neste trabalho esta simplificação foi adotada, entretanto deve ser ressaltado que um projeto inadequado alteraria completamente o desempenho térmico das edificações em estudo, bem como a eficácia de aplicação dos equipamentos empregados na climatização. Portanto, caberia ao projetista parametrizar adequadamente o envelope construtivo para que a aplicação de escalonamento aqui proposto funcionasse de maneira eficiente, necessitando assim de um projeto distinto, ou seja, com diferentes materiais e dimensões para cada uma das oito cidades. No âmbito da manutenção do conforto térmico foi considerado para a estratégia de ventilação a presença de um ventilador do tipo pedestal de 200 W na sala-cozinha (fabricante Britânia modelo C60 Turbo), um ventilador de teto de 126W (fabricante Britânia modelo Cancun BVT02B) em cada quarto.

Para a estratégia de resfriamento evaporativo foi considerado um climatizador evaporativo de $75 \text{ m}^3/\text{h}$ com potência de 265 W (fabricante Ecobrisa, modelo EB-75) e para cada um dos quartos foi considerada um de $35 \text{ m}^3/\text{h}$ (fabricante Ecobrisa, modelo EB-35). Já para o aquecimento artificial foi considerado um aquecedor de ambiente de 1500 W (fabricante Mondial, modelo A05) para a sala-cozinha e um aquecedor halógeno trabalhando na meia potência de 400 W para cada quarto (fabricante Mondial, modelo A09). Para ambos os anos, entre as 23:00 e as 07:00 os equipamentos para manter o conforto térmico da sala-cozinha foram considerados desligados.

Além desse aparelho outra análise adicional, foi proposta, considerando-se que nos dias de maior necessidade de resfriamento evaporativo a família não tivesse posse desses equipamentos. Nesse caso, seria necessário fazer o uso de ar-condicionado. Dessa maneira, foi considerado apenas nessa análise adicional a presença de 3 aparelhos de ar-condicionado, sendo um de $12.000 \text{ BTU}/\text{h}$ na sala-cozinha (fabricante Springer Midea, modelo 42BVQA12M5/38BVQA12M5) e dois de $9.000 \text{ BTU}/\text{h}$ ficando um em cada quarto (fabricante Springer Midea, modelo 42AGQA09M5/38AGQA09M5), sendo que ambos possuem selo PROCEL de eficiência energética.

3.8.2 Eletrodomésticos para Aplicação em 96 Passos de Tempo

O fator preponderante aplicado foi que os equipamentos com posse superior a 15% seriam incluídos no escalonamento, com exceção aos que eram enunciados como não

utilizados em largo período. Diante disto, todos os eletrodomésticos foram relacionados e uma lista deles foi elaborada, onde a marcação “✓” do eletrodoméstico indica sua presença na residência daquela cidade e o sinal “∅” indica que não foi considerado baseado no percentual de corte adotado.

Depois foi extraído do relatório o tempo de uso mais comum e este tempo foi traduzido em passos de 15 minutos, sendo que todos foram acomodados, pois os tempos de uso eram de 5, 10, 15, 30 minutos ou em horas. As características predominantes de cada eletrodoméstico também foram consideradas tentando fazer com que todos eles estivessem na mesma faixa de potência e pudesse ser adotada apenas uma potência para os similares nas diferentes cidades. Nesse contexto, apenas um eletrodoméstico com mesma função foi considerado, como é o caso do ferro de passar comum e o ferro de passar a vapor. Os consumos típicos considerados dos eletrodomésticos foram extraídos de [PROCEL \(2021a\)](#).

Para facilitar a apresentação dos dados das parametrizações dos escalonamentos, algumas simbologias e simplificações foram necessárias. A variável “ \wedge ” indica a posse que poderá ser marcada como positiva (com “✓”) ou negativa (com “∅”), o símbolo de início da janela de operação (α) representa o passo de tempo em que o aparelho poderá ser ligado, o β representa o último passo de tempo em que o aparelho poderá estar ligado e, por fim, “ D ” representa a variável de duração de uso dos aparelhos em passos de tempo.

Os valores de α e β foram dispostos variando de 1 a 96, representando o passo de tempo específico.

Com essas condições, cabe comentar que as únicas modificações, além dos eletrodomésticos, foram das condições climáticas devido às diferenças próprias das zonas envolvidas e dos dias críticos considerados em relação à ausência ou presença de energia solar para aproveitamento (negativo e positivo). Dessa forma, a configuração de escalonamento das quatro primeiras zonas bioclimáticas ficou na [Tabela 13](#) e das quatro últimas zonas ficaram na [Tabela 14](#).

Os intervalos de início e fim da janela de acionamento dos eletrodomésticos [α, β] e a duração de uso típica (D) foram obtidos das curvas específicas de funcionamento diário de cada eletrodoméstico do portal PPH-WEB ([ELETROBRÁS, 2021](#)). Analisando as tabelas é possível notar a ausência dos eletrodomésticos fixos que são inseridos nos mecanismos de escalonamento como um valor totalizado de consumo em cada passo de tempo. Essa abordagem permite que um eletrodoméstico fixo possa ser ligado e desligado em horários diferentes sem precisar lançá-lo várias vezes na lista de escalonamento. Sendo assim, na [Tabela 15](#) constam os parâmetros dos eletrodomésticos fixos das zonas 1 até a zona 4 e a [Tabela 16](#) traz os mesmos para as demais zonas.

Diante das Tabelas 15 e 16 cabem ainda algumas notas, a geladeira considerada foi de 240 litros, haja vista que os modelos encontrados no PPH-2019 estiveram entre 200

Tabela 13 – Parâmetros dos eletrodomésticos flexíveis das zonas bioclimáticas 1 a 4.

Eletrodomésticos	Tipo	Consumo e m cada passo de tempo [Wh]	Zona 1 Curitiba-PR				Zona 2 Santa Maria-RS				Zona 3 São Paulo-SP				Zona 4 Brasília-DF			
			\wedge	α	β	D	\wedge	α	β	D	\wedge	α	β	D	\wedge	α	β	D
			Aspirador de pó	<i>I</i>	179,3	✓	25	72	2	✓	33	72	4	✓	33	72	2	∅
Liquidificador	<i>I</i>	53,4	✓	41	72	1	✓	41	72	2	✓	41	72	1	✓	41	72	1
Máquina de lavar roupas	<i>I</i>	37	✓	25	96	4	✓	25	80	4	✓	29	84	4	✓	29	84	4
Centrífuga de roupas	<i>I</i>	45	∅	-	-	-	∅	-	-	-	∅	-	-	-	✓	85	96	4
Secador de cabelos	<i>I</i>	174	✓	25	30	2	✓	25	30	3	✓	25	30	1	✓	25	30	1
Ferro de passar (vapor)	<i>I</i>	150	✓	29	80	2	∅	-	-	-	∅	-	-	-	∅	-	-	-
Ferro de passar (comum)	<i>I</i>	50	∅	-	-	-	∅	-	-	-	✓	41	72	2	✓	29	68	1
Batedeira	<i>I</i>	37,5	✓	33	72	1	✓	33	72	1	✓	32	72	1	✓	32	72	1
Espremedor de suco	<i>I</i>	9	∅	-	-	-	∅	-	-	-	✓	41	72	1	∅	-	-	-
Forno micro-ondas	<i>I</i>	233	✓	25	30	1	✓	25	30	1	✓	25	30	1	✓	25	30	1
Sandueira	<i>I</i>	111,7	✓	25	30	1	✓	25	30	2	✓	25	30	1	✓	25	30	1
Forno elétrico	<i>NI</i>	125	✓	41	80	4	✓	37	52	6	∅	-	-	-	∅	-	-	-
Cafeteira	<i>NI</i>	55	✓	25	30	1	✓	25	32	6	✓	25	30	1	✓	25	30	1
Fogão elétrico	<i>NI</i>	571	∅	-	-	-	✓	73	88	12	∅	-	-	-	∅	-	-	-
TV	<i>NI</i>	20,8	✓	73	96	8	✓	37	96	12	✓	72	96	12	✓	61	92	12
Chapinha	<i>NI</i>	8,3	✓	25	30	2	✓	25	30	2	✓	25	30	1	✓	25	30	1
Notebook	<i>NI</i>	5	✓	57	88	12	✓	69	92	16	✓	37	88	12	✓	33	88	12
Aparelho de Som	<i>NI</i>	27,5	✓	25	72	4	∅	-	-	-	∅	-	-	-	✓	33	68	8
Computador de mesa	<i>NI</i>	15,8	✓	49	92	4	✓	69	92	12	✓	41	88	12	✓	49	88	16
Boiler elétrico 400L	<i>NI</i>	625	✓	1	96	8	✓	1	96	8	✓	1	96	8	✓	1	96	8
Boiler elétrico 500L	<i>NI</i>	625	∅	-	-	10	∅	-	-	10	∅	-	-	8	∅	-	-	10

Tabela 14 – Parâmetros dos eletrodomésticos flexíveis das zonas bioclimáticas 5 a 8.

Eletrodomésticos	Tipo	Consumo em cada passo de tempo [Wh]	Zona 5 Governador Valadares-MG				Zona 6 Campo Grande-MS				Zona 7 Teresina-PI				Zona 8 Manaus-AM			
			\wedge	α	β	D	\wedge	α	β	D	\wedge	α	β	D	\wedge	α	β	D
			Aspirador de pó	<i>I</i>	179,3	∅	-	-	-	∅	-	-	-	∅	-	-	-	∅
Liquidificador	<i>I</i>	53,4	✓	41	72	1	✓	41	72	1	✓	41	72	1	✓	41	72	1
Máquina de lavar roupas	<i>I</i>	37	✓	29	80	4	✓	25	80	4	✓	29	88	4	✓	25	40	4
Centrífuga de roupas	<i>I</i>	45	∅	-	-	-	∅	-	-	-	∅	-	-	-	∅	-	-	-
Secador de cabelos	<i>I</i>	174	✓	25	30	1	✓	25	30	1	∅	-	-	-	∅	-	-	-
Ferro de passar (vapor)	<i>I</i>	150	∅	-	-	-	✓	33	84	6	∅	-	-	-	∅	-	-	-
Ferro de passar (comum)	<i>I</i>	50	✓	25	88	1	∅	-	-	-	✓	33	72	1	✓	25	76	1
Batedeira	<i>I</i>	37,5	✓	32	72	1	✓	32	72	1	∅	-	-	-	∅	-	-	-
Espremedor de suco	<i>I</i>	9	∅	-	-	-	∅	-	-	-	∅	-	-	-	∅	-	-	-
Forno micro-ondas	<i>I</i>	233	✓	25	30	1	✓	25	30	1	✓	25	30	2	✓	25	30	1
Sandueira	<i>I</i>	111,7	✓	25	30	1	✓	25	30	1	✓	25	30	1	✓	25	30	1
Forno elétrico	<i>NI</i>	125	∅	-	-	-	∅	-	-	-	∅	-	-	-	∅	-	-	-
Cafeteira	<i>NI</i>	55	∅	-	-	-	∅	-	-	-	∅	-	-	-	∅	-	-	-
Fogão elétrico	<i>NI</i>	571	∅	-	-	-	∅	-	-	-	∅	-	-	-	∅	-	-	-
TV	<i>NI</i>	20,8	✓	68	96	12	✓	41	92	12	✓	29	88	12	✓	33	92	12
Chapinha	<i>NI</i>	8,3	✓	25	30	1	✓	25	30	1	✓	25	30	2	✓	25	30	2
Notebook	<i>NI</i>	5	✓	33	92	12	✓	36	88	12	✓	57	96	4	✓	29	88	16
Aparelho de som	<i>NI</i>	27,5	✓	33	80	8	✓	29	80	8	✓	29	56	4	∅	-	-	-
Computador de mesa	<i>NI</i>	15,8	✓	33	88	12	✓	57	88	12	∅	-	-	-	∅	-	-	-
Boiler elétrico 400L	<i>NI</i>	625	✓	1	96	8	∅	-	-	8	∅	-	-	8	∅	-	-	8
Boiler elétrico 500L	<i>NI</i>	625	∅	-	-	10	✓	1	96	10	✓	1	96	10	✓	1	96	10

a 299 litros, o freezer considerado seria vertical de 200 litros, pois dentre os encontrados no relatório a maioria estava na faixa de 150 a 229 litros. O modem de internet teria sido fornecido pela operadora e o receptor de TV seria equivalente ao conversor digital. Tal equivalência foi considerada tendo em vista que em algumas cidades o receptor ou o conversor, ou ainda ambos estavam em posse dos moradores, assim aqui foi considerado apenas o que teve posse predominante em cada cidade. O uso de todos estes eletrodomésticos supracitados foi considerado como contínuo no horizonte diário, ou seja, ao longo de todos 96 passos de tempo do dia.

Tabela 15 – Parâmetros dos eletrodomésticos fixos das zonas bioclimáticas 1 a 4.

Eletrodomésticos	Consumo em cada passo de tempo [Wh]	Zone 1 Curitiba-PR				Zone 2 Santa Maria-RS				Zone 3 São Paulo-SP				Zone 4 Brasília-DF			
		\wedge	α	β	D	\wedge	α	β	D	\wedge	α	β	D	\wedge	α	β	D
		Geladeira	9	✓	1	96	96	✓	1	96	96	✓	1	96	96	✓	1
Freezer	16,5	✓	1	96	96	✓	1	96	96	✓	1	96	96	✓	1	96	96
Modem	2	✓	1	96	96	✓	1	96	96	✓	1	96	96	✓	1	96	96
Lâmpadas fluorescentes compactas	5,75	✓	v	v	v	✓	v	v	v	✓	v	v	v	✓	v	v	v
Receptor de TV	2	✓	1	96	96	✓	1	96	96	✓	1	96	96	∅	0	0	0
Telefone sem fio	0,25	✓	1	96	96	∅	0	0	0	∅	-	-	-	∅	0	0	0
Carregador de celular	4,25	✓	v	v	v	✓	v	v	v	✓	v	v	v	✓	v	v	v

Tabela 16 – Parâmetros dos eletrodomésticos fixos das zonas bioclimáticas 5 a 8.

Eletrodomésticos	Consumo em cada passo de tempo [Wh]	Zona 5 Governador Valadares-MG				Zona 6 Campo Grande -MS				Zona 7 Teresina-PI				Zona 8 Manaus-AM			
		\wedge	α	β	D	\wedge	α	β	D	\wedge	α	β	D	\wedge	α	β	D
		Geladeira	9	✓	1	96	96	✓	1	96	96	✓	1	96	96	✓	1
Freezer	16,5	✓	1	96	96	∅	0	0	0	✓	1	96	96	∅	0	0	0
Modem de Internet	2	✓	1	96	96	✓	1	96	96	✓	1	96	96	✓	1	96	96
Lâmpadas fluorescentes compactas	5,75	✓	v	v	v	✓	v	v	v	✓	v	v	v	✓	v	v	v
Receptor de TV	2	✓	1	96	96	✓	1	96	96	∅	0	0	0	✓	1	96	96
Telefone sem fio	0,25	∅	0	0	0	∅	0	0	0	∅	0	0	0	∅	0	0	0
Carregador de celular	4,25	✓	v	v	v	✓	v	v	v	✓	v	v	v	✓	v	v	v

Tanto os celulares quanto as lâmpadas estão indicados nestas tabelas com α , β e D com a nota “v” de variável. Para a definição da ligação dos carregadores de celular foram considerados dois por residência em todas as cidades e que estariam carregando das 00:00 às 05:00, das 11:00 às 12:30 e das 23:00 às 00:00, sendo comum aos moradores carregar o celular enquanto dormem ou almoçam. Já para as lâmpadas foi considerada uma análise mais elaborada, no portal PPH-WEB (ELETROBRÁS, 2021) é possível obter na aba lâmpadas, para cada estado do Brasil, a posse média de lâmpadas por residência e uma curva com o percentual de lâmpadas utilizadas a cada hora do dia. Estes valores foram extraídos e o valor de lâmpadas arredondado para o valor inteiro maior se a parte decimal for maior ou igual a 0,5. Sendo assim, o valor percentual foi dividido por 100 e multiplicado pelo número total de lâmpadas e arredondado para o valor inteiro acima, prevendo assertivamente o número de lâmpadas ligadas a cada hora e no caso foi repetida esta informação aos passos de tempo dentro desta hora.

As lâmpadas das residências foram consideradas como fluorescentes compactas para fins de padronização e por ser a mais encontrada. No caso, a maior parte dos moradores sabe que a lâmpada é fluorescente compacta, mas não sabem a potência e, por isto, foi considerado 23 W. No caso específico, foram consideradas seis lâmpadas nas zonas 2,3,4,7 e 8, sete lâmpadas nas zonas 1 e 5 e oito lâmpadas na zona 6.

Para os aparelhos empregados na manutenção do conforto foi considerada para a residência uma configuração similar a aplicação anterior em 24 passos de tempo, possuindo

dois quartos, um banheiro e uma sala-cozinha. Foram considerados dois ventiladores, climatizadores evaporativos aquecedores na sala-cozinha para garantir melhor circulação do ar. Além disso, o ar-condicionado da sala-cozinha foi de 18.000 *BTU/h*. Os equipamentos de climatização que foram encontrados no site de consumo típico do PROCEL INFO (PROCEL, 2021a) excetuando-se os climatizadores que foram tomados valores comerciais. Desta forma, a Tabela 17 apresenta as especificações, quantidades, o cômodo em que está presente contendo também o consumo horário e o consumo no passo de tempo.

Tabela 17 – Equipamentos empregados para manutenção de conforto para as 8 zonas.

Especificação	Quantidade	Cômodo	Marca	Modelo	Consumo horário [Wh]	Consumo no passo de tempo [Wh]
Ventilador de mesa	2	Sala-cozinha	Típico	PROCEL	72	18
Ventilador de teto	2	Quartos	Típico	PROCEL	73	18,25
Climatizador móvel	2	Sala-cozinha	Ecobrisa	EB-75	265	66,25
Climatizador fixo	2	Quartos	Ecobrisa	EB-35	110	27,5
Ar condicionado 10000 BTU	2	Quartos	Típico	PROCEL	592783	148,2075
Ar condicionado 18000 BTU	1	Sala-cozinha	Típico	PROCEL	1223,7	305,925
Aquecedor	2	Quartos	Típico	PROCEL	1612	403
Aquecedor	2	Sala-cozinha	Típico	PROCEL	1612	403

A configuração de funcionamento consiste em considerar no período das 00:00 às 07:00 da manhã (passos 1 a 28) e das 22:00 às 00:00 (passos 89 a 96) todos os equipamentos de climatização da sala-cozinha desligados. Sendo assim, o consumo no passo de tempo para garantir o conforto nestes períodos serão reduzidos. Durante o dia foi considerado que todos os cômodos estivessem ocupados, então de posse da quantidade de equipamentos e dos consumos nos passos de tempo deles foi definido um sumário do custo-conforto para as estratégias no passo de tempo, com as respectivas especificações do período entre parênteses, sendo “noturno-dormir” para os períodos que a sala-cozinha estará desocupada e diurno para os demais períodos, este sumário segue apresentado na Tabela 18.

Tabela 18 – Sumário do custo-conforto para cada passo de tempo.

Equipamento (período)	Consumo no passo de tempo [kWh]
Ventilador (diurno)	0,073
Ventilador (noturno-dormir)	0,037
Resfriamento evap. (diurno)	0,188
Resfriamento evap. (noturno-dormir)	0,055
Ar-condicionado (diurno)	0,602
Ar-condicionado (noturno-dormir)	0,296
Aquecedor (diurno)	1,612
Aquecedor (noturno-dormir)	0,806
Aquecimento solar sem sol (diurno)	0,806
Aquecimento solar sem sol (noturno-dormir)	0,403
Passivo / conforto (dia ou noite)	0

Outras questões sobre a Tabela 18 devem ser esclarecidas, o aquecimento possui uma subcategoria que reflete a situação de que ocorre a necessidade de aquecimento solar

do ambiente associado ou não com inércia térmica e não há radiação para tal ($\sigma = 0$), sendo assim foi considerado que os aquecedores em meia potência conseguiriam suprir essa necessidade, entretanto quando a estratégia necessária foi o aquecimento artificial a potência será máxima.

Mais um imperativo deste trabalho foi exemplificar a obtenção do valor de consumo no passo de tempo em kWh, para isto é possível utilizar o aquecedor (diurno) da [Tabela 18](#) como exemplo. No período diurno necessitando aquecer, caindo na zona de aquecimento artificial, os quatro aquecedores devem ser acionados na potência máxima nos três cômodos de longa permanência, portanto seriam somados os consumos no passo de tempo dos quatro aquecedores ou multiplicado o consumo de um deles por quatro ($4 \times 403Wh = 1,612kWh$).

Com todos parâmetros e métodos devidamente dispostos o próximo capítulo apresenta os resultados obtidos das simulações para as oito cidades escolhidas.

Capítulo 4

Resultados e Discussões

Neste capítulo, os resultados para cidades das oito zonas bioclimáticas serão apresentados e discutidos. As análises apresentadas são relacionadas aos diferentes climas, obtidos via EPW e de dados do INMET ([INMET, 2021](#)).

A partir da parametrização do mecanismo de escalonamento consolidado e parametrizado com a devida base metodológica, para o cumprimento do propósito de atendimento a sustentabilidade, foram efetuadas as aplicações deste mecanismo para avaliar as vantagens em adotá-lo.

4.1 Escalonamento ótimo em 24 Passos de Tempo na Cidade de Brasília-DF

A aplicação de escalonamento em 24 passos de tempo em Brasília-DF se diferenciou das demais por possuir dados climáticos mais recentes oriundos de estação do INMET ([INMET, 2021](#)), mais especificamente da estação automática do Observatório Meteorológico de Brasília (OMBRA), dos anos de 2019 e 2020. Além disso, leva em consideração a diferença de ocupação da residência e consumo pela família antes e durante a pandemia de COVID-19.

Neste contexto foram escolhidos 4 dias de cada ano, sendo um com a predominância de estratégias passivas (PSV), outro de ventilação (VNT), um terceiro de resfriamento evaporativo (RE) e um de aquecimento artificial (AQC), uma vez que tem nenhum dos dois anos uma amostra na carta bioclimática entrou na zona de necessidade de ar-condicionado.

Na parte de comparativo só foram analisados dois outros cenários na tarifa convencional, a casa com chuveiro, sem boiler nem SAS e com UFV (equivalente ao cenário 5 da metodologia) e a casa nas mesmas condições, entretanto sem a UFV (equivalente ao

cenário 7 da metodologia), esta numeração foi anteriormente apresentada na [Capítulo 3](#).

4.1.1 Análise Climática de Brasília-DF para 24 Passos de Tempo

A análise foi iniciada com o uso do programa *Analysis Bio* (ONO, 2010) e dos filtros desenvolvidos no R lançando as amostra climáticas disponíveis dos dois anos, ressalta-se que foram removidas amostras climáticas incompletas totalizando assim 8.663 amostras do ano de 2019 e 8.783 amostra do ano de 2020, sendo este último um ano bissexto. Cada ano comum contém 8.760 horas (365 dias) e em anos bissextos são 8.784 horas (366 dias) sendo que cada conjunto de dados anuais do INMET deveria idealmente possuir uma amostra por hora. Em algumas das variáveis no conjunto de dados ocorreram valores indicando defeito em alguns dos sensores da estação, as amostras destas horas foram removidas reduzindo assim o número de amostras consideradas em cada um dos dois anos, sendo que 97 amostras foram removidas do conjunto de dados de 2019 e apenas uma em 2020.

Dos resultados da entrada dessas amostras na carta pelos dois mecanismos foram obtidos relatórios que serviram de subsídios para a elaboração da [Tabela 19](#), na qual as ocorrências percentuais das 12 estratégias principais na casa são apresentadas.

Tabela 19 – Estratégias na carta bioclimática conforme Analysis Bio v.2.2 (ONO, 2010) e filtros elaborados no R (R Core Team, 2019).

Cod.	Estratégia	Ocorrência em 2019 [%]	Ocorrência em 2020 [%]
1	Conforto (passivo)	57	51,5
2	Ventilação (mecânica ou natural)	9,7	10,7
3	Resfriamento evaporativo	0,3	0,5
4	Massa para resfriamento	0	0
5	Ar condicionado	0	0
6	Umidificação	0	0
7	Alta inércia + Aquecimento solar	26,7	31,3
8	Aquecimento solar (passivo)	1,5	2,4
9	Aquecimento artificial	0,1	0,2
10	Alta inércia + Ventilação	0	0
11	Massa + Ventilação + Resfriamento Evaporativo	4,3	2,7
12	Massa + Resfriamento Evaporativo	0,4	0,7

Observa-se que em Brasília-DF (zona bioclimática 4) ocorreu predomínio de estratégias passivas que englobam as regiões de conforto térmico e aquecimento solar passivo sem ou com necessidade complementar de alta inércia térmica. Posteriormente a estratégia mais recorrente foi a de ventilação mecânica seguida pela estratégia de resfriamento evaporativo associado ou não massa térmica e ventilação. Sendo assim foi efetuado o agrupamento das estratégias nos filtros secundários desenvolvidos para as principais estratégias consideradas e foi obtida a [Tabela 20](#).

A singularidade de obtenção de um total de 85,2% de ocorrência de estratégias passivas nos 2 anos em estudo demonstra que Brasília possui uma demanda anual baixa

Tabela 20 – Estratégias agrupadas conforme filtros elaborados.

N°	Estratégia	Ocorrência em 2019 [%]	Ocorrência em 2020 [%]
1	Passiva	85,20	85,20
2	Ventilação	9,700	10,700
3	Resfriamento evaporativo	5,00	3,90
4	Aquecimento artificial	0,1	0,2

de climatização se o projeto do envelope construtivo for adequadamente concebido. Entretanto deve ser frisado que dentro dessas horas de estratégia passiva estão as que o uso de aquecimento solar seria necessário até mesmo em horas em que a radiação solar é indisponível, tanto no período noturno quanto nos dias nublados. Isso ocorre porque a concepção inicial da carta bioclimática foi para a aplicação em projeto e as adaptações aqui visam utilizá-la na operação da climatização residencial. Diante disso para os dias de escalonamento uma análise adicional se torna necessária para determinar se o aquecimento solar realmente será efetivo para manter o conforto.

Aplicando o mecanismo de rotulação das amostras climáticas para as estratégias principais e agrupadas se tornou possível filtrar os dias com maiores números de horas cujas estratégias escolhidas fossem necessárias. Diante disso se tornou possível escolher os dias de cada estratégia para cada ano para que os escalonamentos fossem realizados nesses dias. Assim a [Tabela 21](#) apresenta os dias escolhidos e o total de horas necessárias das estratégias em cada um deles.

Tabela 21 – Dias escolhidos para as aplicações do escalonamento em 2019 e 2020.

Ano	Dia de teste	Data	Total de horas necessárias para cada estratégia (1-4)			
			Passivas (PSV)	Ventilação (VNT)	Resfriamento Evaporativo (RE)	Aquecimento Artificial (AQC)
2019	1	12/08	24	0	0	0
	2	20/03	12	12	0	0
	3	22/09	14	0	10	0
	4	11/07	15	0	0	9
2020	1	1/09	24	0	0	0
	2	5/04	6	16	2	0
	3	29/09	9	0	15	0
	4	28/05	15	0	0	9

Vale relembrar e é possível notar pela própria tabela apresentada que o dia de teste 1 é o de predominância de estratégias passivas, enquanto o dia de teste 2 é o de predominância da ventilação, o 3 de resfriamento evaporativo e o 4 de aquecimento artificial, seguindo assim uma sequência crescente de custo energético das estratégias para a manutenção do conforto térmico.

4.1.2 Faturas Diárias na Aplicação em 24 Passos de Tempo

Aplicando os escalonamentos nos dias escolhidos obtiveram-se faturas que podem ser resumidas na [Tabela 22](#), onde os oito valores das faturas dos dias de teste são apresentados.

Tabela 22 – Faturas diárias de consumo de energia elétrica obtidas.

Ano	Dia de teste	Estratégia	Data	Fatura diária de eletricidade [R\$]
2019	1	Passivas (PSV)	12/08	0.0 (*)
	2	Ventilação (VNT)	20/03	1,92
	3	Resfriamento evaporativo (RE)	22/09	0,25
	4	Aquecimento artificial (AQC)	11/07	4,00
2020	5	Passivas (PSV)	01/09	0.0 (*)
	6	Ventilação (VNT)	05/04	3,83
	7	Resfriamento evaporativo (RE)	29/09	1,99
	8	Aquecimento artificial (AQC)	28/05	5,18

Observando os valores das faturas é possível notar que nos dias de estratégias passivas foram obtidos valores nulos de faturas, entretanto são marcados com "(*)" para sinalizar que nestes dias ocorreram saldos de energia elétrica a ser compensada, de acordo com as regras da tarifa horária branca e da geração distribuída no Brasil. Neste caso a residência se comportou predominantemente como um fornecedor em termos de sua energia gerada, levando em consideração que a bateria também ajuda a obter tal resultado.

Embora fosse esperado que os dias de teste VNT fossem mais baratos energeticamente que os dias de teste RE ocorreu o contrário, dois motivos levaram a isso, o número de horas necessárias para a ventilação é maior (12 horas em 2019 e 16 horas em 2020) e ao mesmo tempo nos dois dias de ventilação a geração foi menor conforme [Figura 15](#), sem contar que no dia de VNT de 2020 há a necessidade de apenas duas horas de resfriamento evaporativo.

Os valores das tarifas diárias foram relativamente baixos, cabendo destacar que estes escalonamentos ocorreriam apenas nos dias de semana, haja vista que na modalidade da tarifa horária branca para os finais de semana e feriados o que vigora é a tarifa fora de ponta, ou seja, a de menor valor tarifário durante todas as horas do dia.

Para os dias PSV com valores marcados com "(*)" na [Tabela 22](#) foi obtida uma compensação de consumo de energia para outros dias, no caso do saldo a compensar na tarifa convencional simplesmente seria contabilizada a potência injetada e descontada na fatura ao final do mês ficando válida até os próximos 60 meses ([BRASIL, 2022](#)). Entretanto no caso da tarifa horária branca a compensação deve ser feita primeiramente no mesmo bloco de preço tarifário que a energia foi injetada, e se ainda sobrar a compensação poderá ser feita em outros blocos mediante o processo que consiste em proporcionalizar o valor do kWh e uso do sistema de distribuição nos diferentes horários. Mais detalhes sobre os

resultados de compensação serão explanados na subseção de análises comparativas desta seção.

4.1.3 Balanços Energéticos na Aplicação em 24 Passos de Tempo

O balanço energético consiste na apresentação dos componentes de eletricidade e seu intercâmbio resultante com a rede. A resposta devolvida pelo solucionador IBM CPLX traz um vetor de binários para cada eletrodoméstico com o estado de ligado (1) ou desligado (0) bem como os ciclos de carga ou descarga da bateria em cada passo de tempo para a minimização da fatura diária respeitando as restrições do problema. Em conjunto com os parâmetros obtidos de acionamentos para a manutenção de conforto no R, os valores de irradiação solar global, os valores de temperatura de bulbo seco do ar e as especificações das cargas nos passos de tempos se torna possível construir as curvas de conforto, cargas fixas e geração fotovoltaica.

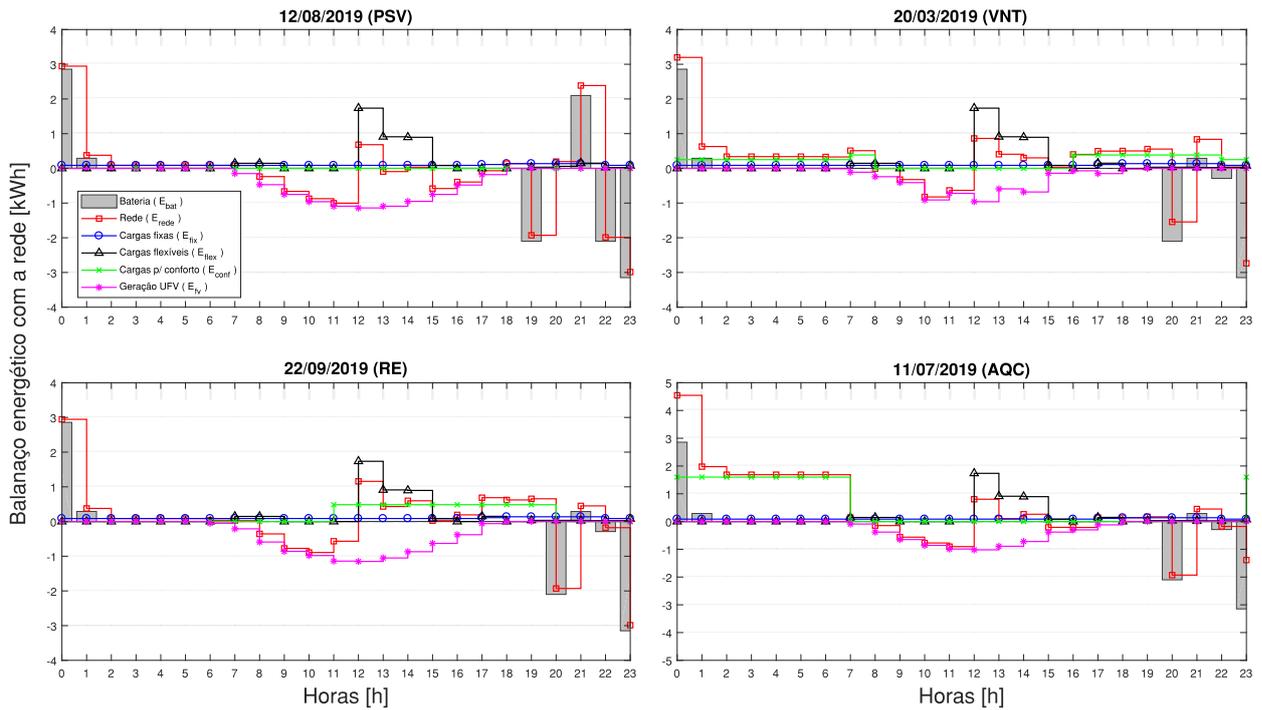
Desta forma a [Figura 16](#) apresenta o balanço energético do ano de 2019, ano este que usa os dados contemporâneos do PPH-2019 ([ELETROBRÁS, 2019](#)) para os parâmetros elétricos e considera condições normais de ocupação da residência, isto é, sem isolamento social, conforme estabelecido na metodologia. Avaliando a ilustração foi notado que ocorreu certa similaridade entre os balanços energéticos nos dias de teste do ano de 2019, principalmente no funcionamento das cargas flexíveis (E_{flex}), mesmo que com condições climáticas distintas.

Observando as condições da bateria (E_{bat}) percebeu-se que o ciclo de carga ocorreu predominantemente no início do dia com descarga na parte final do dia. Portanto a bateria foi utilizada pelo HEMS evitando grande absorção energética da rede nos períodos intermediário e de pico e descarregando no horário de pico. A única discrepância evidente ocorreu no dia de estratégias passivas de 2019 (PSV, 12/08/2019) quando a bateria foi carregada em maior quantidade no período de pico imediatamente após uma descarga e tornando a ser descarregada na última hora do dia, ocorrendo assim três descargas e uma recarga de patamares maiores que 1 kWh no período noturno deste dia.

Destaca-se que não ocorreram grandes variações no formato da curva de geração fotovoltaica, exceto no dia de ventilação (VNT, 20/03/2019), no qual houve uma redução da produção perceptível em relação aos demais dias de teste com as principais variações ocorrendo entre as 11:00 e as 13:00 horas. Posteriormente ao serem observados os dados climáticos deste dia foi constatado que ocorreu precipitação (chuva) totalizando 16,6 mm entre as 7:00 e 8:00 horas. Dessa forma, nuvens no local durante o dia podem ter ocasionado as reduções percebidas na curva da produção horária de energia fotovoltaica.

A [Figura 17](#) ilustra a dinâmica do escalonamento nos dias de teste para o ano de

Figura 16 – Balanço energético do ano de 2019.



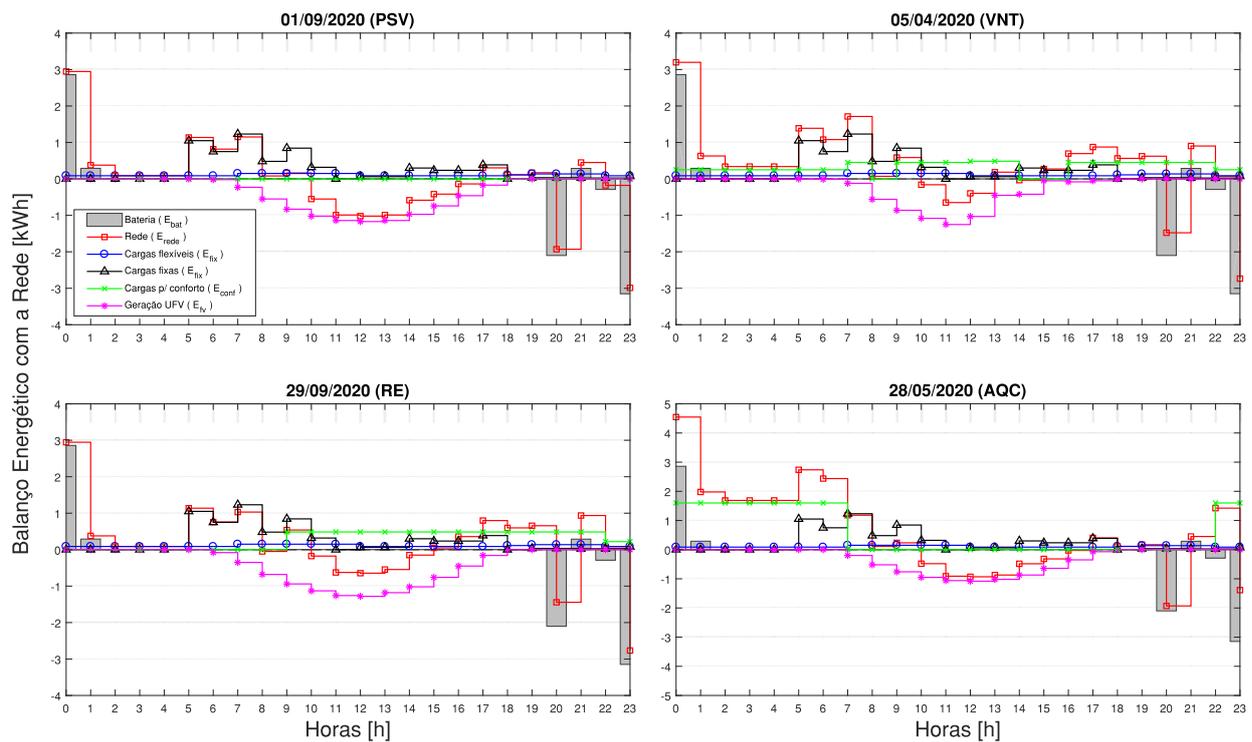
Fonte:Elaborado pelo Autor(2021).

2020, ano de isolamento social devido a pandemia de COVID-19, em que também pode ser observada alguma similaridade no escalonamento das cargas flexíveis (E_{flex}) entre os dias deste ano. Além disso, em ambos os anos foi possível perceber que nos períodos de maior disponibilidade de energia fotovoltaica (entre as 10:00 e 12:00 em 2019 e entre 12:00 e 14:00 em 2020) ocorre injeção de energia elétrica na rede. Cabe comentar que no período noturno de todos os dias de teste do ano de 2020 o escalonamento resultante utilizou o descarregamento da bateria como suprimento energético, quando a geração fotovoltaica é nula e ocorrem os blocos tarifários de maior preço.

Comparando as curvas das cargas flexíveis (E_{flex}) dos dois anos nota-se que os picos de uso de eletricidade foram maiores e mais concentrados no período vespertino no ano de 2019, em contrapartida, no ano de 2020 os patamares foram menores, menos concentrado e ocorridos em maior parte no período matutino. Uma causa para isso pode ser proveniente da permanência maior dos moradores na residência no ano de 2020 decorrente do isolamento social pela pandemia de COVID-19, com conseqüente flexibilização nos períodos de uso de parte dos eletrodomésticos.

A manutenção do conforto térmico (E_{conf}) influenciou diretamente o intercâmbio com a rede (E_{rede}) na medida em que sua proporção com as demais cargas aumentou. Este fenômeno pode ser exemplificado considerando o dia de necessidade de aquecimento (AQC) para o conforto térmico em 2019 (11/07/2019) e em 2020 (28/05/2020). Nestes

Figura 17 – Balanço energético do ano de 2020.



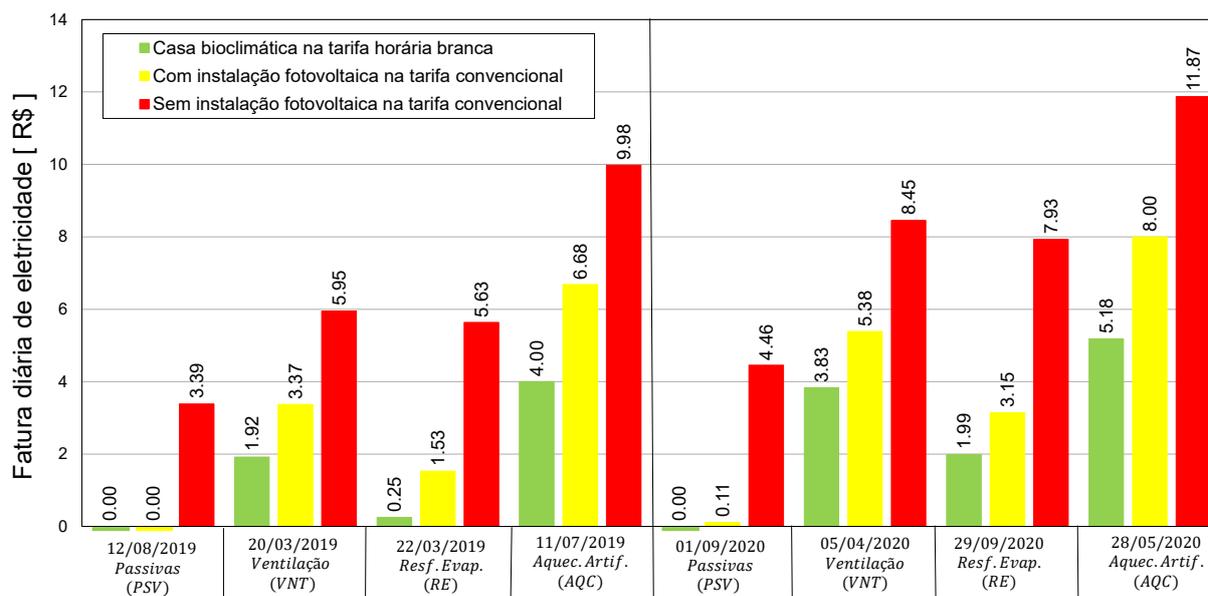
Fonte:Elaborado pelo Autor(2021).

dias desde o início até as 7:00 horas da manhã maior patamar de energia foi absorvido da rede para manter os aquecedores dos quartos ligados, bem como ao final do dia, as 23:00 horas em 2019 e as 22:00 horas em 2020.

4.1.4 Análise Comparativa dos Cenários na Aplicação em 24 Passos de Tempo

Os resultados previamente obtidos do escalonamento para a casa inteligente bioclimática podem ser analisados de forma comparativa tomando como base a casa bioclimática sem adesão ao DRP, ou seja, sujeita à tarifação convencional sem uso de bateria e escalonamento do consumo. Assim, foram considerados dois cenários no contexto da tarifa convencional, variando entre a residência possuir ou não a instalação fotovoltaica.

Neste sentido, foi realizado o balanço diário da eletricidade consumida e gerada e efetuado o cálculo desta fatura com o valor da tarifa convencional. O caso simulado também não considera o uso de bateria, uma vez que a energia injetada pela UFV pode ser compensada em horário diferente, utilizando a rede como uma bateria virtual. Desta forma, a [Figura 18](#) apresenta os valores comparativos para cada um dos anos e dos dias de teste.

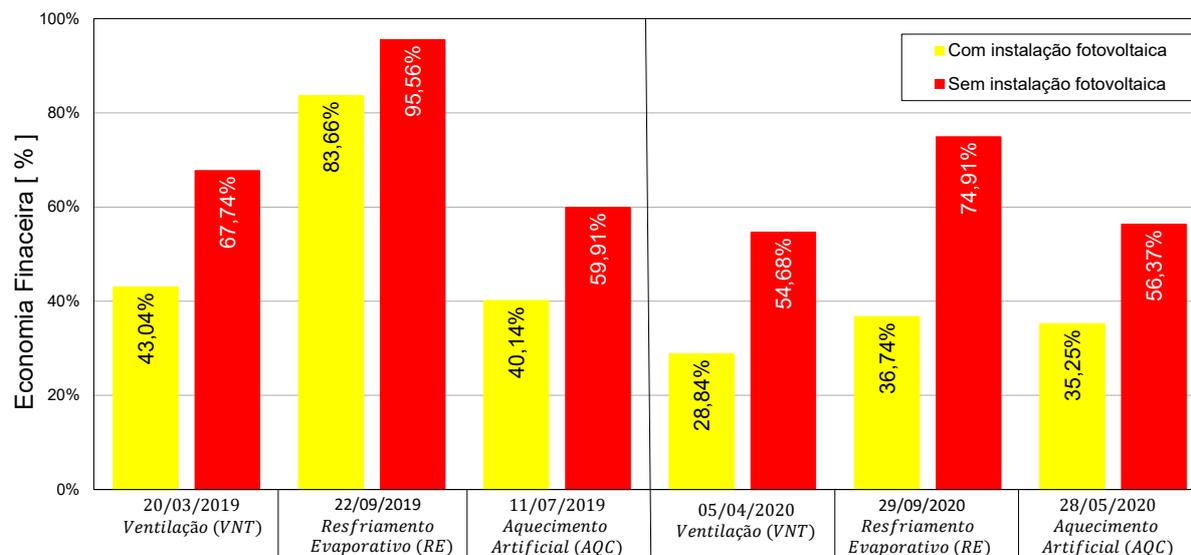
Figura 18 – Análise comparativa de faturas da casa bioclimática do escalonamento da casa bioclimática.

Fonte:Elaborado pelo Autor(2021).

Por meio da [Figura 18](#) foi possível notar que o custo para o mesmo consumo na tarifa convencional resultou em valores maiores da fatura diária de eletricidade. Somente nos dias em que há a predominância de estratégias passivas para a manutenção de conforto térmico (PSV, 12/08/2019 e 1/09/2020) ao utilizar-se a instalação fotovoltaica, tem-se contas de energia iguais ou pouco superiores a aquelas obtidas quando da adesão ao DRP. Esta situação demonstra que no uso de estratégias passivas a residência se comporta de forma sustentável, aproveitando ao máximo os recursos ambientais tanto na geração de energia fotovoltaica quanto no aproveitamento das condições climáticas exteriores mesmo sem o uso da bateria e do agendamento de uso dos eletrodomésticos.

Usando como base comparativa os cenários na tarifação convencional, a [Figura 19](#) apresenta a economia financeira percentual dos dias de teste com exceção dos dias em que as estratégias passivas para manutenção do conforto térmico foram dominantes (PSV). Estes dias não foram considerados pois a economia obtida foi de 100%, ou seja, o custo de eletricidade foi nulo e ainda foram deixados saldos de consumo de eletricidade a serem compensados em outros dias. Assim, este gráfico constitui um resumo da economia financeira percentual do cenário inteligente e sustentável para os seis dias restantes de teste em relação a casa bioclimática com e sem geração fotovoltaica.

Para cada um dos dias cujas datas e estratégias para a manutenção do conforto são dispostas abaixo de cada dupla de barras economia percentual em relação a casa bioclimática com e sem instalação fotovoltaica respectivamente em amarelo e vermelho. Por exemplo, no dia de ventilação (VNT) do ano de 2019 (20/03) a casa inteligente bioclimática economizou 43.04% em relação a casa bioclimática com instalação fotovoltaica e 67.74%

Figura 19 – Economia financeira percentual do cenário inteligente e sustentável na casa bioclimática em relação aos demais cenários.

Fonte:Elaborado pelo Autor(2021).

em relação a mesma casa sem esta fonte renovável de energia.

A economia financeira percentual variou entre 28.84% e 95.56%, demonstrando que o uso da gestão da bateria e do escalonamento também podem trazer benefícios financeiros consideráveis aos habitantes, mesmo que estes tenham uma construção adequada ao clima e utilizem estratégias de menores custos energéticos. Nota-se que ocorre na concepção proposta o alinhamento entre duas estratégias de gerenciamento pelo lado da demanda (DSM): a resposta a demanda (DR) atuando para as necessidades dinâmicas do sistema de suprimento e a eficiência energética proveniente do envelope construtivo adequado ao clima local e dos equipamentos eficientes e supostos adequadamente dimensionados.

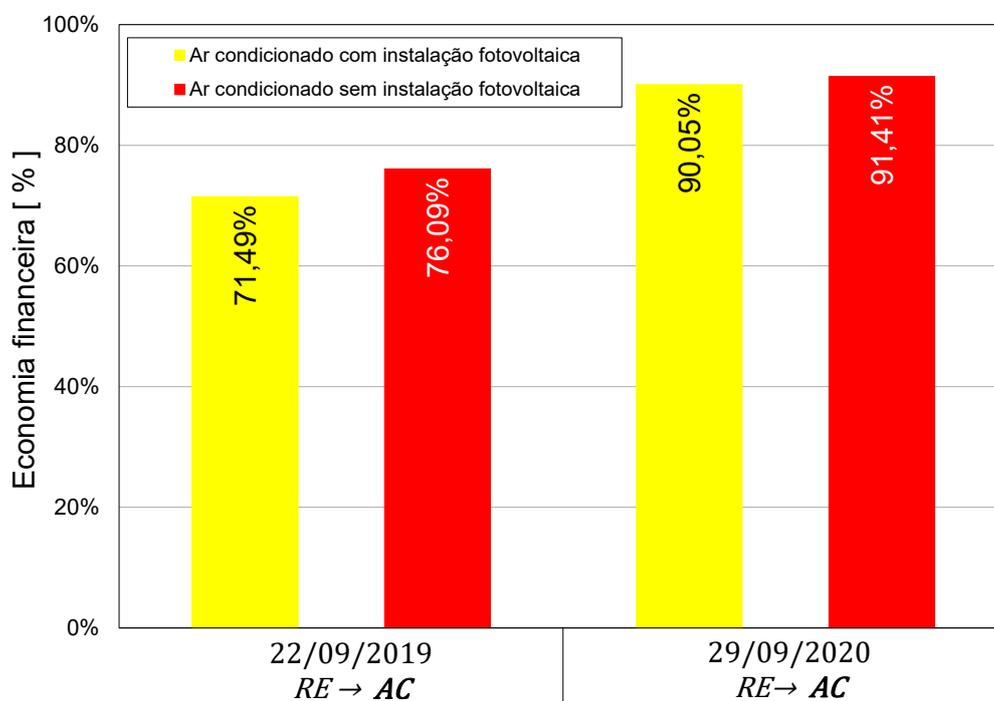
Para verificar eventuais vantagens ou desvantagens em utilizar a estratégia de RE, uma opção de custo energético intermediária entre ventiladores e condicionadores de ar, foi suposto que o ar-condicionado fosse utilizado em sua substituição. Neste contexto, foi considerado um consumo médio obtido do catálogo de fabricantes e do site para dois condicionadores de ar com alto padrão de eficiência energética, sendo um de 9.000 BTU/h para cada um dos dois quartos e um de 12.000 BTU/h para a sala-cozinha, mais bem especificados no [Capítulo 3](#). Desta forma, o consumo horário médio durante o dia seria de aproximadamente 2,494 kWh para cada hora com os três condicionadores de ar climatizando os cômodos de atividades permanentes e para o período de dormir 1,614 kWh para cada hora nos quartos, substituindo o resfriamento evaporativo e considerando o ar-condicionado adequadamente dimensionado.

Evidente que o consumo de eletricidade de carga térmica de um condicionador de ar pode variar dependendo do envelope construtivo e da carga térmica no ambiente,

entretanto este consumo considerado foi para manter a temperatura do ar em 24 °C e extraída de dados de condicionadores de ar com classificação “A” pelo INMETRO. Deve ser ressaltado que tal consumo trata-se de uma estimativa e foi tomada como referencial simplificado para o comparativo proposto.

Com essa modificação, a [Figura 20](#) ilustra as economias financeiras percentuais do cenário proposto nesta tese participando do DRP brasileiro de tarifa horária branca com RE para os dias adequados a esta estratégia (RE, 22/09/2019 e 29/09/2020) em relação ao uso do AC considerando ou não a presença da instalação fotovoltaica na tarifação convencional. Diante disso observou-se uma economia financeira percentual variando entre 71.49% e 91.41% na casa inteligente bioclimática.

Figura 20 – Economia financeira da casa bioclimática com resfriamento evaporativo.



Fonte:Elaborado pelo Autor(2021).

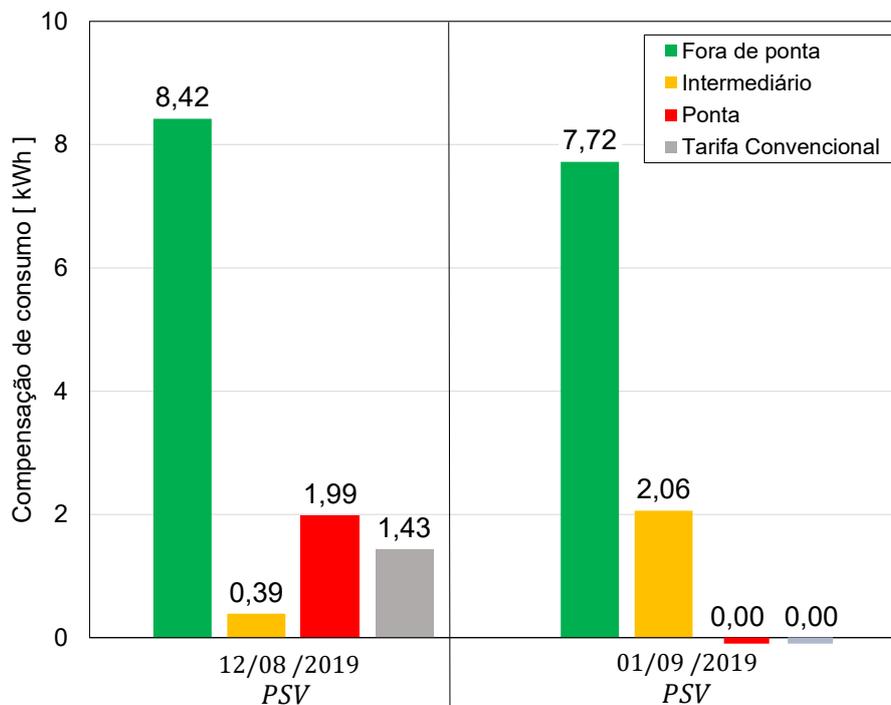
Para esta configuração, o valor da fatura diária variou entre R\$ 13,44 e 22,36. Esses resultados deixam claro o alto custo associado a adoção do AC e que o RE poderia substituí-lo com alta economia quando as condições climáticas favorecerem sua aplicação. Ademais o uso do AC seria dispensável para a residência concebida com as premissas bioclimáticas na cidade de Brasília nestes dois anos de estudos. Se torna interessante salientar que o climatizador evaporativo tipo direto adotado pode trabalhar em modo de ventilação, isto é, sem umidificar o ar em períodos úmidos podendo assim atender alternativamente as estratégias de VNT e RE.

No contexto dos anos de 2019 e 2020 desta aplicação em 24 passos de tempo a energia gerada excedente não poderia ser vendida para a concessionária, cabendo apenas ao

consumidor que faça compensação de seu consumo em outro horário. Sendo assim, o melhor ao consumidor seria entrar em regime de compensação para uso em outros horários, o que é denominado como compensação em autoconsumo. No DRP considerado a compensação deve ocorrer primeiramente no mesmo bloco de preço em que a energia foi injetada ao final da fatura mensal.

Dessa forma, a [Figura 21](#) ilustra o saldo energético a ser compensado em kWh nos blocos de preço para os dias de teste de 12/08/2019 e 01/09/2020, sendo estes justamente os dias em que há predominância do uso de estratégias PSV para manutenção do conforto térmico e, portanto, sem consumo de eletricidade adicional, sendo que nos demais dias não houve excedente da geração. Também é mostrada a compensação no cenário de tarifa convencional em cinza para o mesmo padrão de consumo. Em ambos os casos foi considerado que a casa foi projetada de maneira bioclimática para a cidade em estudo.

Figura 21 – Compensação de energia no cenário inteligente e sustentável e na tarifa convencional.



Fonte:Elaborado pelo Autor(2021).

Para tarifa horária branca ocorreu o montante de compensação que superou 9,37 kWh em 2019 e 9,78 kWh em 2020 comparando com a compensação na tarifa convencional, sendo que em 2020 a compensação foi nula, ou seja, foi necessário o pagamento de eletricidade para a concessionária. Tal situação pode ser explicada pela presença da bateria que favorece o escalonamento no cenário de tarifa branca. Sendo assim, este cenário se mostrou amplamente favorável ao escalonamento do consumo, cabe agora abranger a análise para as oito zonas bioclimáticas brasileiras.

4.2 Escalonamento Ótimo para Cidades das Distintas Zonas Bioclimáticas Brasileiras

O uso de cidades em oito zonas bioclimáticas tem como intuito verificar a eficácia do escalonamento inteligente do consumo da energia elétrica abrangendo as diferentes características climáticas e estratégias de climatização no Brasil. Ademais, foi pretendido analisar a influência do uso abrangente da energia solar, com enfoque na sustentabilidade, para verificar as vantagens de adicionar inteligência no consumo de uma casa bioclimática, que por natureza possui um consumo energético minimalista e sustentável.

Partindo da escolha de dois dias que consideram o aproveitamento abrangente da energia solar ou não em cada cidade escolhida, o escalonamento é aplicado em 96 passos de tempo no horizonte diário, ou seja, em passos de 15 minutos. Nas subseções adiante os resultados obtidos são apresentados.

4.2.1 Análises Climáticas das Oito Cidades Escolhidas

Com a metodologia de escolha das cidades já explicada, as próximas análises a serem apresentadas passam a ser as escolhas dos dias de testes em cada cidade representante das zonas bioclimáticas. Sendo o dia enumerado como 1 tido como dia crítico negativo com baixa disponibilidade solar e como 2 tido como dia crítico positivo, ou seja, com alta disponibilidade solar. Para ambos os dias foram escolhidas estratégias condizentes com as necessidades anuais por climatização obtidas da carta bioclimática.

Deve ser salientado que as análises de escolhas dos dias foram efetuadas em escala horária e após os dias escolhidos os dados climáticos foram seccionados em 96 passos de tempo com o programa computacional *EnergyPlus 8.7.0* (NREL, 2017). Isto posto segue a relação das cidades, com a zona representante e o ano do arquivo EPW com as estratégias que nortearam as escolhas dos dias apresentando-os ao mesmo tempo:

1. Curitiba-PR (Zona 1, 2008) – as amostras climáticas horárias indicaram a necessidade de 17,5% de aquecimento solar passivo e 45,5% combinado com alta inércia, sendo o aquecimento artificial necessário em 4,91%. Como dia 1 (negativo) foi escolhido o dia 04/10, com necessidade de 24 horas de aquecimento solar com radiação global horizontal total de $390 \text{ Wh/m}^2.\text{dia}$, sendo este dia com a menor média diária de radiação global horizontal do ano, muito abaixo de $4.084 \text{ Wh/m}^2.\text{dia}$, utilizada como variável para dimensionar a UFV e o SAS. Como dia 2 (positivo) foi escolhido o dia 07/09, com necessidade de 11 horas de AQC com radiação global horizontal total de $6.559 \text{ Wh/m}^2.\text{dia}$, o primeiro dia com mais de 10 horas de aquecimento artificial

em um *ranking* de radiação solar a superar a média de $4.084 \text{ Wh/m}^2.\text{dia}$, utilizada como parâmetro de projeto da UFV e do SAS;

2. Santa Maria-RS (Zona 2, 2003) – as amostras climáticas horárias indicaram a necessidade de 29,6% de aquecimento solar com alta inércia, seguido por 13,7% por ventilação e 13% de aquecimento solar passivo. Diante disso, o dia 1 (negativo) escolhido foi 24/jul com 24 horas de aquecimento solar e com apenas $320 \text{ Wh/m}^2.\text{dia}$, muito abaixo do $4292 \text{ Wh/m}^2.\text{dia}$, usado para dimensionar a UFV e o SAS. O dia 2 (positivo) escolhido foi 05/03 com 21 horas de necessidade de ventilação e dentre os dias com mais horas com esta necessidade foi o primeiro a superar o valor de $4.292 \text{ Wh/m}^2.\text{dia}$, sendo neste dia um total de $5.598 \text{ Wh/m}^2.\text{dia}$. Cabe comentar que neste dia há a necessidade de ligação de ar-condicionado em 2 horas do dia;
3. São Paulo-SP (Zona 3, 2008) – as amostras climáticas horárias indicaram que a alta inércia com aquecimento solar é predominante com 40,2% como estratégia além da região de conforto (42,4%), sendo assim, dois dias de aquecimento solar foram escolhidos. O dia 1 (negativo) escolhido foi o dia 29/01 com 23 horas de necessidade de aquecimento solar e mínimo total diário de radiação com $516 \text{ Wh/m}^2.\text{dia}$. O dia 2 (positivo) escolhido foi o dia 18/09 com 24 horas de necessidade de aquecimento solar e máximo total diário de radiação com $4.520 \text{ Wh/m}^2.\text{dia}$, maior que a média de referência de $4.023 \text{ Wh/m}^2.\text{dia}$;
4. Brasília-DF (Zona 4, 2001) – as amostras climáticas horárias indicaram um total de 32,5% das horas do ano com necessidade de alta inércia com aquecimento solar seguido pela VNT com 5,42% de necessidade. Diante disso, o dia 1 (negativo) escolhido foi o 27/05 de menor média diária de radiação global no ano com 17 horas de necessidade de aquecimento solar, o valor diário total de radiação foi de $1.269 \text{ Wh/m}^2.\text{dia}$, em torno de 25% da média anual de $5.052 \text{ Wh/m}^2.\text{dia}$, que é alta. O dia 2 (positivo) escolhido foi o dia 02/11 com mais horas de necessidade de aquecimento solar (16 horas) que com $5.171 \text{ Wh/m}^2.\text{dia}$ supera os $5.052 \text{ Wh/m}^2.\text{dia}$;
5. Governador Valadares-MG (Zona 5, 2009) – as amostras climáticas horárias indicaram a ventilação como a estratégia com mais horas no ano (31,4%) seguido pelo aquecimento solar com 14,4% das horas. Sendo assim, o dia 1 (negativo) escolhido foi 04/06 sendo o segundo dia de menor média de radiação diária por hora ($55,125 \text{ Wh/m}^2.\text{dia}$) do ano e com necessidade de 15 horas de aquecimento solar com total de $1.323 \text{ Wh/m}^2.\text{dia}$. O dia 2 (positivo) escolhido foi 22/01, dia de 24 horas de necessidade de ventilador e maior radiação total diária ($6.360 \text{ Wh/m}^2.\text{dia}$), mais que a média diária anual média $5.030 \text{ Wh/m}^2.\text{dia}$;
6. Campo Grande-MS (Zona 6, 2008) – as amostras climáticas horárias indicaram 22,9% de ventilação e 13,5 % de aquecimento solar com alta inércia. O dia 1 (negativo)

escolhido foi 08/08 de menor média diária de radiação global horizontal, em torno de $19.7 Wh/m^2.dia$, tendo necessidade de 16 horas de aquecimento solar, cabe comentar que neste dia se torna necessário o uso de ventilador entre as 7 as 9 da manhã. O dia 2 (positivo) selecionado foi 18/01 sendo o primeiro dia com muitas horas de necessidade de ventilação (24 horas) que supera a média de $4.966 Wh/m^2.dia$ com $5.527 Wh/m^2.dia$;

7. Teresina-PI (Zona 7, 2006) – as amostras climáticas horárias indicaram 46,1% de VNT e um total de 15,51% do RE isolado ou em conjunto com outras estratégias. O dia 1 (negativo) escolhido foi 08/02, dia com menor média de radiação solar diária do ano com uma média de $69,25 Wh/m^2.h$ e um total de radiação de $1.662 Wh/m^2.dia$, sendo este valor menor que 30% da média anual diária para dimensionar a UFV e o SAS. Neste dia são necessárias 17 horas de VNT e também 6 horas de RE, com apenas 1 hora de conforto. O dia 2 (positivo) escolhido foi o dia 01/11 em que ocorre simultaneamente a menor média diária de umidade relativa (40,125%), a terceira maior média horária de radiação global ($322.17 Wh/m^2.h$) com necessidade de 11 horas de resfriamento evaporativo e 3 horas de necessidade de ventilação, representa um dia com $6.673 Wh/m^2.dia$, superando em mais de 17% a média diária utilizada para simular a UFV e o SAS;
8. Manaus-AM (Zona 8, 2008) – as amostras climáticas horárias indicaram 75,6% de necessidade por ventilação seguida de 11% de necessidade de ar-condicionado. Assim, o dia 1 (negativo) escolhido foi 07/04 com 24 horas de necessidade de VNT, uma média horária de apenas $32,125 Wh/m^2.h$ de radiação global horizontal, sendo a segunda menor média do ano e um total de apenas $771 Wh/m^2.dia$ sendo este valor apenas 16,35% da média utilizada para o dimensionamento da UFV e do SAS. O dia 2 (positivo) escolhido foi 05/11 um dos dois dias com maior quantidade de horas de necessidade de ar condicionado (19 horas do dia) e maior radiação diária total entre os dois $6.735 Wh/m^2.dia$, em torno de 42% acima da radiação utilizada para projeto da UFV e do SAS. Cabe comentar que as demais horas necessitam de VNT.

Diante dos dias de teste escolhidos foi possível perceber dias dominantes de todas as estratégias ativas possíveis de climatização. A partir das regras e modelos estabelecidos foram geradas as curvas de geração fotovoltaica e curva de consumo basal de conforto e então foram realizados os escalonamentos com resultados apresentados nas subseções adiante.

4.2.2 Faturas Diárias nas Oito Cidades Escolhidas

As faturas finais comparadas entre si fornecem informações cruciais para o levantamento de referenciais seguros acerca da hipótese da pesquisa. O motivo para isto é que a maioria dos parâmetros de escalonamento considerados para os dois dias de teste são os mesmos, com exceção do aquecedor elétrico do *boiler*. Neste sentido, as mudanças das condições climáticas implicam em diferentes demandas por conforto térmico, geração fotovoltaica e entrada ou não do sistema auxiliar do *boiler* no escalonamento. Assim sendo, a [Tabela 23](#) apresenta todas as faturas para todas as cidades, dias, anos do EPW obtidas pelo escalonamento.

Tabela 23 – Faturas diárias de consumo de energia elétrica obtidas para as oito zonas .

Zona	Cidade	UF	EPW [ano]	Dia crítico	Aproveitamento solar	Data	Fatura diária [R\$]
1	Curitiba	PR	2008	1	Negativo	04/10	11,725
				2	Positivo	01/09	3,872
2	Santa Maria	RS	2003	1	Negativo	24/07	20,884
				2	Positivo	05/03	4,010
3	São Paulo	SP	2008	1	Negativo	29/01	9,272
				2	Positivo	18/09	0,598
4	Brasília	DF	2001	1	Negativo	27/05	7,827
				2	Positivo	02/11	0,695
5	Governador Valadares	MG	2009	1	Negativo	04/06	6,143
				2	Positivo	22/01	0,000 (*)
6	Campo Grande	MS	2008	1	Negativo	08/08	9,969
				2	Positivo	18/01	0,000 (*)
7	Teresina	PI	2006	1	Negativo	08/02	3,651
				2	Positivo	01/11	0,000 (*)
8	Manaus	AM	2008	1	Negativo	08/08	4,032
				2	Positivo	18/01	0,000 (*)

Conforme esperado, em todos os dias críticos positivos, quando o sol é um recurso presente no escalonamento, o valor de fatura foi menor, sendo até R\$ 16,874 menor no dia crítico positivo que foi o caso de Santa-Maria-RS. Tal fenômeno ocorre, neste caso específico pelas grandes diferenças de geração fotovoltaica e demanda por conforto térmico, que serão mostradas oportunamente na próxima subseção ([subseção 4.2.3](#)). Por outro lado, a menor diferença ocorreu para a cidade de Teresina-PI, pois trata-se de uma cidade com alta média de irradiação total diária, o que faz com que mesmo no dia crítico ocorra uma geração considerável, além de que as necessidades por conforto térmico ficaram em mesma ordem de grandeza.

Outra questão relevante a ser levantada é que algumas cidades, de acordo com o PPH-2019 ([ELETROBRÁS, 2019](#)) tiveram um número bem menor de eletrodomésticos, considerando o percentual de corte de posse adotado para a entrada ou não dos eletrodomésticos no escalonamento (15%). Percebeu-se que em alguns dias a tarifa foi nula, ou seja, seu custo financeiro foi zero, entretanto, saldos de energia elétrica em kWh foram deixados para posterior compensação, assinalados assim com “(*)”.

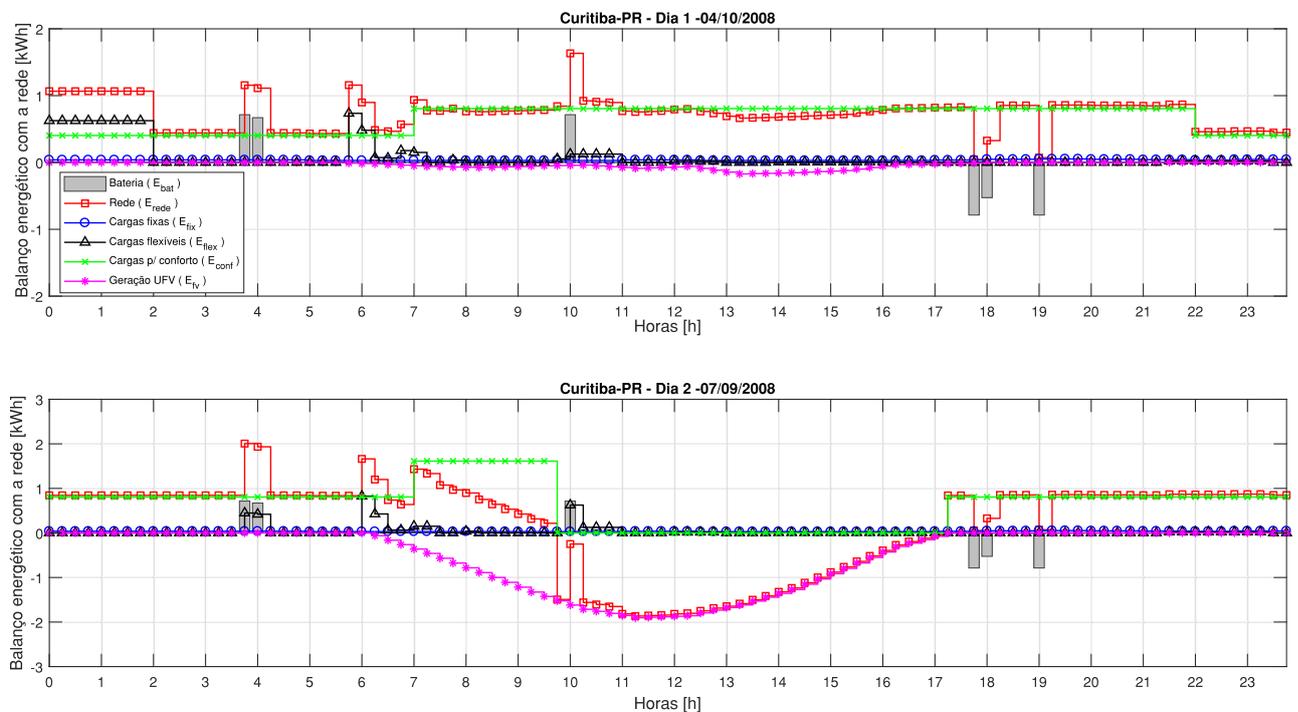
Evidente que se os objetos de comparação são os cenários equivalentes na tarifa convencional, estes seriam um referencial seguro para determinar se os preços das faturas diárias são altos ou baixos, e isto será disposto oportunamente em seção subsequente (subseção 4.2.4).

4.2.3 Balanços Energéticos nas Oito Cidades Escolhidas

A operação da gestão residencial pelo mecanismo de escalonamento é melhor observada por meio do balanço energético com a rede, ou seja, a energia elétrica líquida da rede (E_{rede}) é fruto da soma algébrica de seus componentes (E_{fix} , E_{flex} , E_{conf} e E_{fv}), respeitando o princípio de conservação de energia. Ressalta-se que na prática o consumo energético do aquecedor elétrico do *boiler* (E_{boiler}) simplesmente entra com seus parâmetros (α , β e D) no mecanismo como um aparelho eletrodoméstico não-interrompível (*NI*) nos dias críticos negativos, aqui adotados como dias de teste 1 de cada cidade. Portanto nos gráficos apresentados o consumo de energia elétrica do *boiler* estrará na curva E_{flex} .

Sendo assim, a apresentação dos balanços energéticos obtidos do solucionador nos dois dias de teste são apresentados em ordem crescente das zonas e posteriormente comentados, partindo da zona bioclimática 1, Curitiba-PR na [Figura 22](#).

Figura 22 – Balanços energéticos de Curitiba-PR (Zona 1, 2008) para os dois dias de teste.



Fonte:Elaborado pelo Autor(2021).

Observa-se pela [Figura 22](#) que o dia 1 (negativo) é muito mais caro em termos

de manutenção do conforto térmico ao mesmo tempo que a contribuição solar é baixa, praticamente nula, embora no dia 2 o patamar de potência total do aquecimento artificial seja maior. Outra observação interessante é que devido a menor capacidade de carga e descarga da bateria comercial utilizada nesta aplicação se comparada com as utilizadas por Huang, Tian e Wang (2015), Cavalca (2018), Huang et al. (2018) e Fonseca et al. (2020) demonstra que tal parâmetro resulta na diminuição do número de ciclos de carga e descarga.

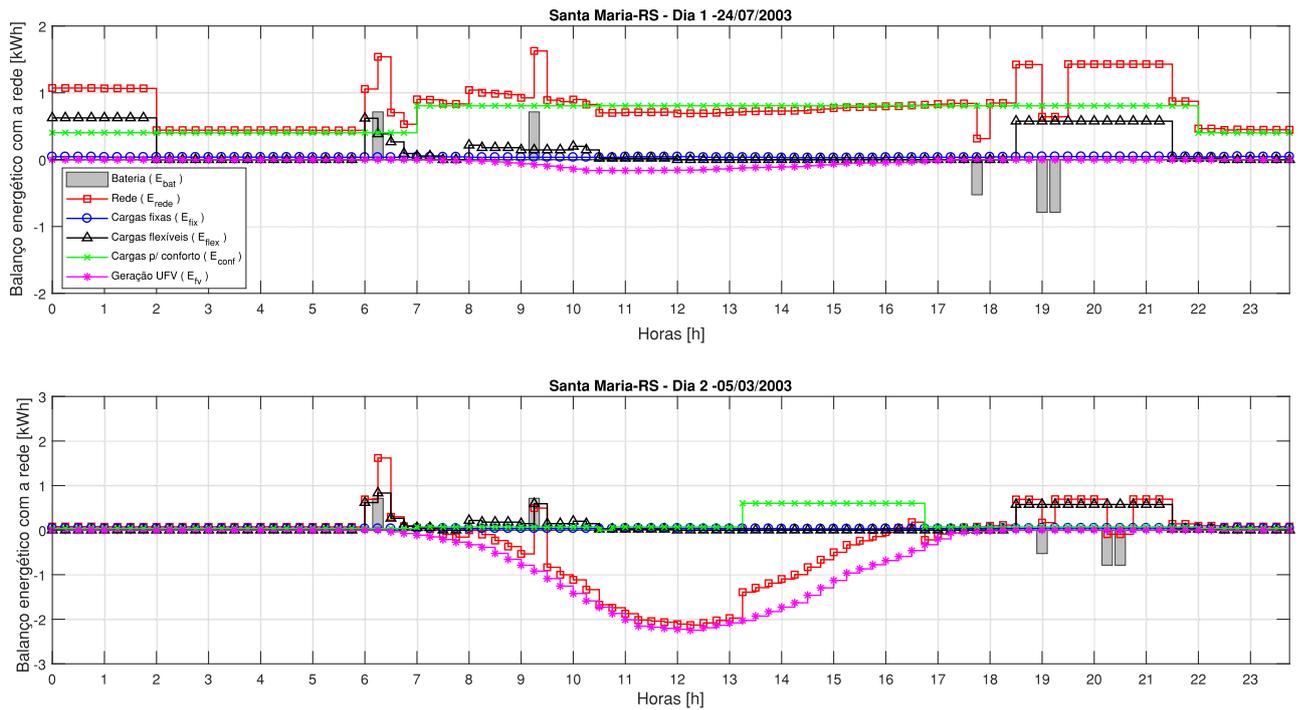
Outra verificação visual observável foi que as cargas flexíveis representam uma parcela pequena em relação ao consumo para garantir o conforto térmico, sendo esta parcela a mais influente no consumo, mesmo com a residência sendo concebida de maneira bioclimática. A casa desta cidade teve uma necessidade predominantemente de aquecimento artificial ou aquecimento solar que no dia com baixa radiação solar que foi substituído pelo aquecimento artificial em ajuste médio de capacidade, com o dia positivo mais exigente em patamar de carga mesmo tendo a colaboração da energia solar.

Seguindo na apresentação dos balanços energéticos obtidos, a Figura 23 ilustra o intercâmbio energético com a rede dos dias críticos da cidade de Santa Maria-RS (zona 2, 2008). Claramente pela Figura 23 fica evidente a diferença de custo das faturas, de R\$ 20,8884 no dia crítico negativo (1) e de R\$ 4,010 no positivo (2). No dia crítico positivo, pela curva para manter o conforto (E_{conf}), a ventilação foi predominante na maior parte de dia, exigindo uma quantidade ínfima de energia elétrica no passo de tempo de tal forma que fica imperceptível no gráfico. Entretanto, há a ocorrência de um patamar maior das 13:15 às 16:45, neste período foi necessário o uso do condicionador de ar, o que demonstra que Santa Maria-RS possui uma amplitude de variação climática diferenciada, com necessidades extremas de frio e calor no mesmo ano. Pela observação da curva resultante de energia na rede (E_{rede}) observa-se que das 09:15 às 15:45 horas a residência se comportou predominantemente como exportador de energia elétrica a exceção de um passo de tempo com a bateria em carga, às 09:15 horas.

Para a cidade de São Paulo os balanços obtidos são apresentados pela Figura 24, onde a curva para manutenção do conforto (E_{conf}) apresentou diferenças nos dois dias de teste devido ao aproveitamento do aquecimento solar no dia 2. Nos dois o aquecimento solar foi a estratégia dominante, entretanto no dia 1 inteiro e apenas no período fora do horário solar do dia 2 não haveria disponibilidade para tal tipo de aquecimento, sendo assim, nestes passos de tempo o aquecedor artificial foi acionado em meia carga. Dessa forma, no dia 2 percebe-se que bem ao final da geração fotovoltaica o aquecimento artificial é ligado em meia carga, sendo este o mesmo patamar do dia 1 neste mesmo período.

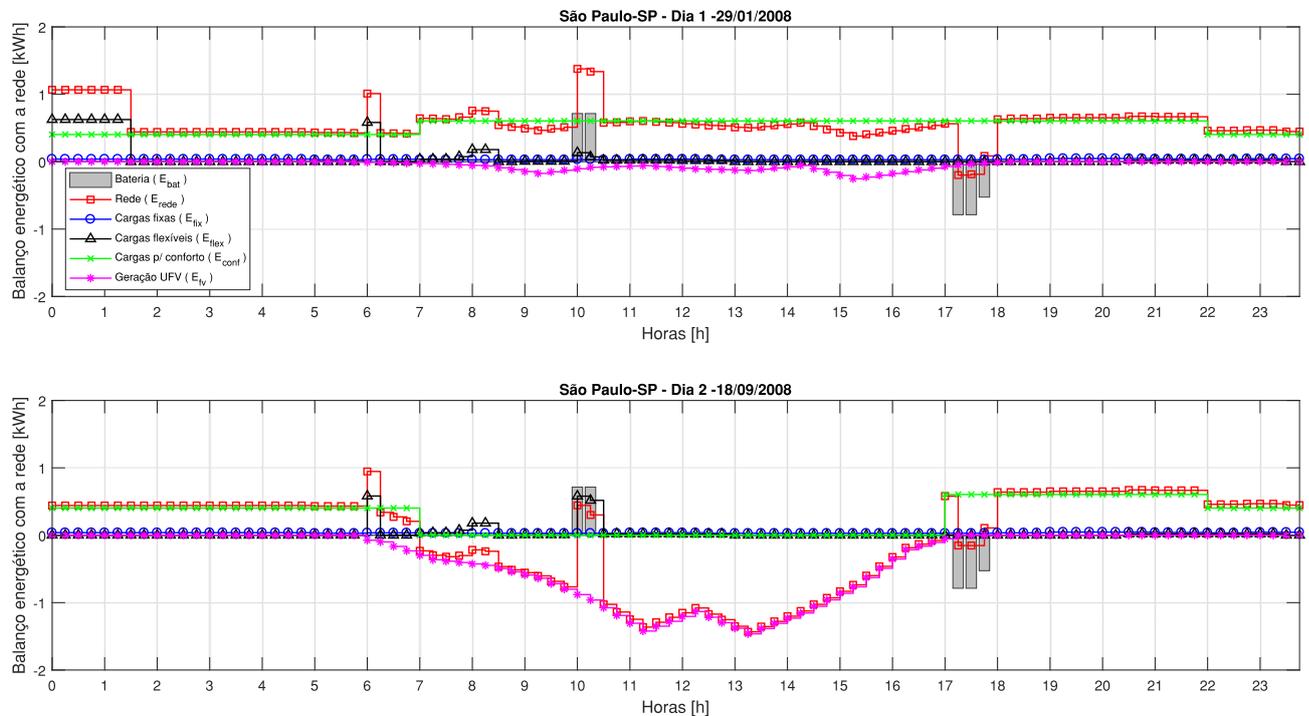
Já a curva de geração fotovoltaica possibilitou uma exportação para a rede da 06:15 às 17:00 horas do dia crítico positivo (2), com um pequeno intervalo de carregamento da bateria em 2 ciclos, entre as 10:00 a 10:30 horas. Outro fato interessante é que a bateria

Figura 23 – Balanços energéticos de Santa Maria-RS (Zona 2, 2003) para os dois dias de teste.



Fonte:Elaborado pelo Autor(2021).

Figura 24 – Balanços energéticos de São Paulo-SP (Zona 3, 2008) para os dois dias de teste.



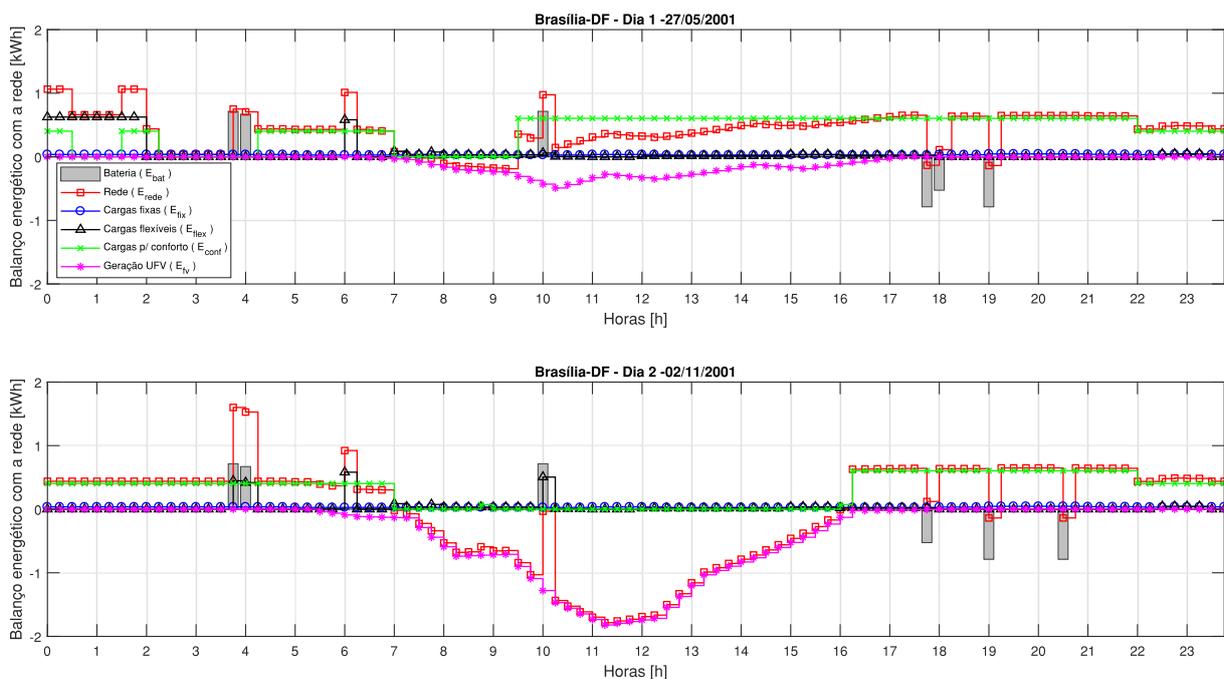
Fonte:Elaborado pelo Autor(2021).

foi descarregada em 3 ciclos depois do fim da geração fotovoltaica, entre as 17:15 até as

18:00 que praticamente zerou o consumo neste período. A curva de geração fotovoltaica oscilou, o que demonstra variação na irradiação solar global que pode ter sido ocasionada por nuvens no local se adensando das 11:15 às 12:15 horas e voltando a aumentar e seguir uma tendência aproximadamente simétrica até o pôr do sol.

A próxima cidade a ter seu intercâmbio com a rede e seus componentes analisados foi a de Brasília-DF, assim seu balanço pode ser observado na [Figura 25](#). No primeiro dia de teste, apesar de ser um dia de baixa insolação figuram alguns passos de tempo na zona de conforto tal como o período das 07:00 às 09:30, mas com predominância do aquecimento solar com pouca disponibilidade do sol neste dia. No dia 2 a estratégia predominante foi o aquecimento solar, entretanto com o sol disponível entre as 07:15 e 16:15 o custo energético para a manutenção do conforto ficou praticamente nulo, com exceção de um passo das 08:45 às 09:00 e outra das 16:00 e 16:15 horas, sendo estes passos de necessidade de ventilação total na casa que é de apenas 73 Wh se ligado no passo de 15 minutos.

Figura 25 – Balanços energéticos de Brasília- DF (Zona 4, 2001) para os dois dias de teste.

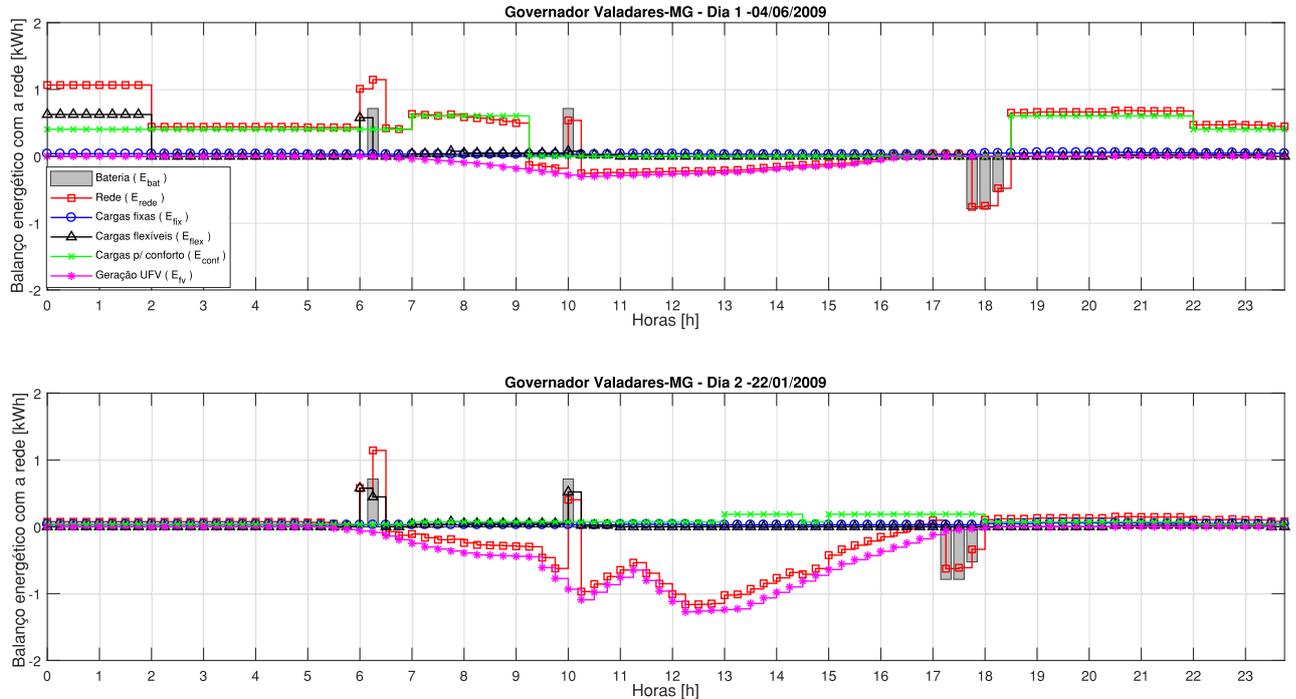


Fonte:Elaborado pelo Autor(2021).

A cidade de Governador Valadares-MG apresentou balanços energéticos conforme [Figura 26](#). Sendo o dia 1 com predominância do aquecimento artificial com ausência do sol, entretanto com um período de conforto entre as 09:15 e as 18:30 (37 passos de tempo consecutivos). Já no dia 2 a estratégia predominante foi a ventilação, que possui o menor custo dentre as estratégias ativas, com dois períodos com necessidade de resfriamento evaporativo sendo o primeiro entre as 13:00 e 14:30 horas e depois entre as 15:00 e 18:00 horas, por influência do baixo custo energético esta fatura diária foi nula. Quase todo período de geração de energia solar foi obtido um balanço negativo, ou seja, a residência

passou a exportar energia para a rede com exceção do passo de tempo entra as 10:00 e as 10:15, em que a bateria foi carregada e algumas cargas flexíveis foram ligadas (liquidificador, notebook e o computador).

Figura 26 – Balanços energéticos de Governador Valadares- MG (Zona 5, 2009) para os dois dias de teste.



Fonte:Elaborado pelo Autor(2021).

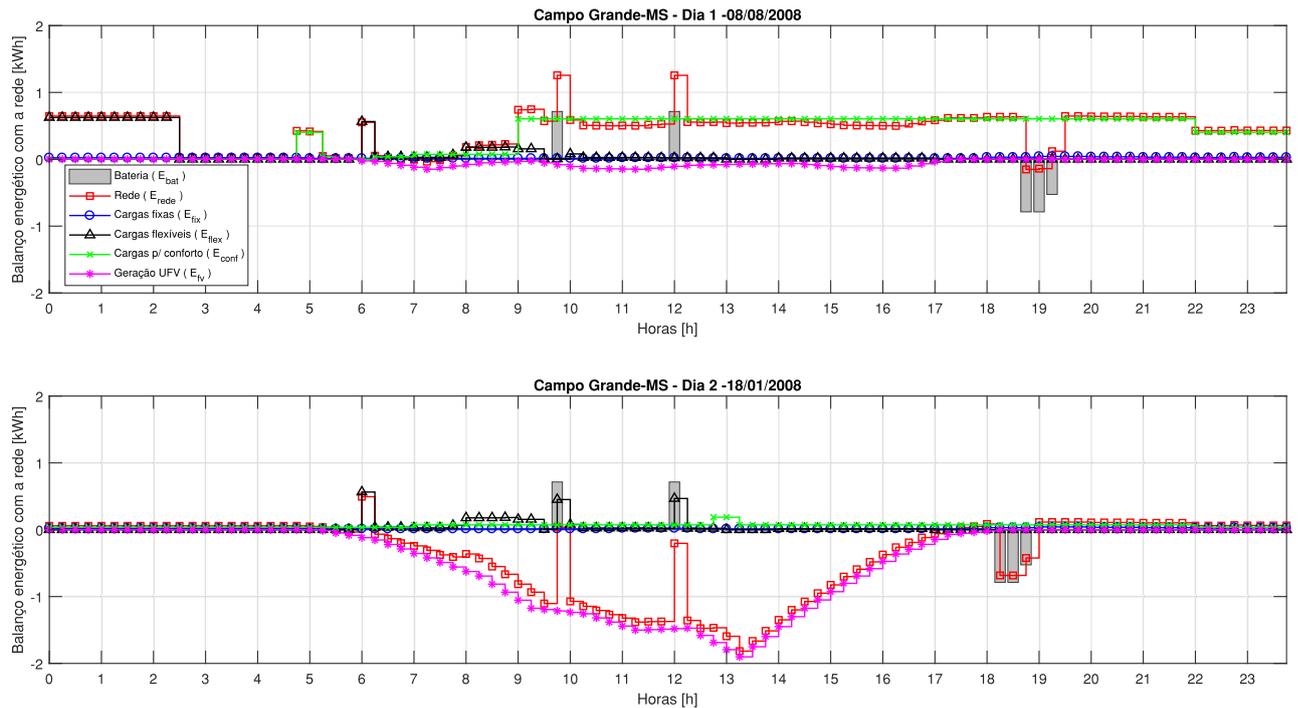
Em todos os balanços o consumo das cargas fixas (E_{fix}) foi de baixo patamar fazendo com que suas contribuições sejam imperceptíveis, até mesmo da geladeira, uma vez que seu consumo em um passo de tempo de 15 minutos é baixo (9 Wh, vide tabelas 15 e 16). Também é interessante notar que apesar das diferenças entre as características climáticas o escalonamento das cargas flexíveis é de certa forma similar, com diferença muita das vezes devido a inserção do aquecimento elétrico do *boiler* que acaba entra em algum intervalo no dia 1, o que não ocorre no dia 2.

A cidade de Campo Grande-MS, representante da zona bioclimática 6 teve um dia crítico negativo (1) com passos de tempo de conforto, aquecimento solar com ausência do sol que se tornaria aquecimento artificial na meia carga em vários passos de tempo e mais alguns passos de ventilação. Sendo assim, a [Figura 27](#) ilustra a dinâmica do intercâmbio da casa inteligente bioclimática com a rede elétrica.

Para o dia 1 de Campo Grande-MS foi considerado o aquecimento artificial a meia carga como substituto do aquecimento solar, com o resistor do *boiler* sendo ligado no começo do dia (das 00:00 até as 02:30). No dia 2 como as estratégias necessárias foram de custo mais baixo, com predominância da ventilação e com dois passos de tempo de

resfriamento evaporativo (das 12:45 às 13:15), a fatura foi zerada no cenário inteligente e sustentável deixando saldo energética a compensar. Interessante que em ambos os dias a bateria residencial foi descarregada no mesmo período de três passos, das 18:15 às 19:00. Outro fato interessante a ser destacado é que para o dia 2 a bateria foi carregada na janela de maior geração da UFV e injetou fora do período de produção fotovoltaica e dentro da janela de tarifa de ponta, das 17:30 às 19:00.

Figura 27 – Balanços energéticos de Campo Grande-MS (Zona 6, 2008) para os dois dias de teste.

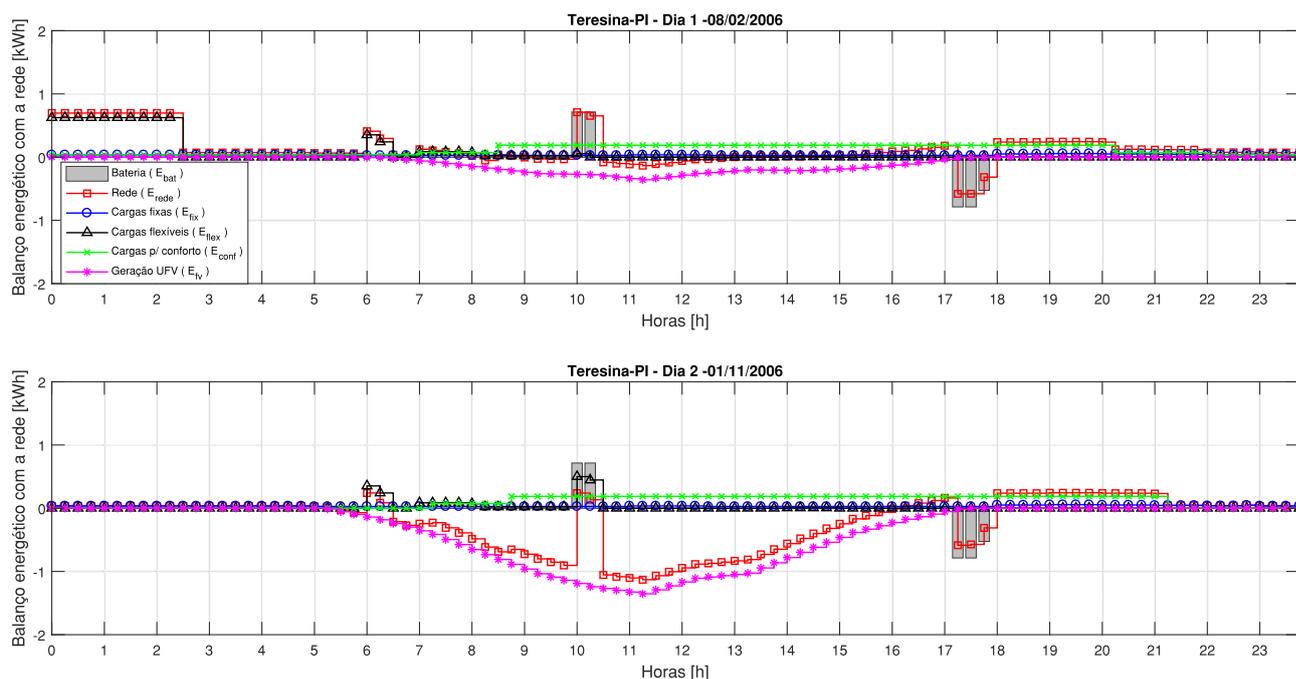


Fonte:Elaborado pelo Autor(2021).

Para a cidade de Teresina-PI o escalonamento é apresentado na [Figura 28](#). Esta cidade apresenta um número reduzido de eletrodomésticos e uma forte geração fotovoltaica, tanto que mesmo no dia crítico negativo escolhido (1) há uma geração que até colabora que a edificação seja por algum momento mais que zero, alimentando a rede com energia elétrica da 10:30 até 12:15. No dia 1 a estratégia predominante é a VNT com necessidade 49 passos de tempo e o RE com 47, sendo que este último é necessário das 08:30 até as 20:15. No dia 2 o RE é predominante, sendo indispensável em 50 passos de tempo, das 08:45 até as 21:15 horas, a fatura deste dia foi nula deixando saldo de carga a ser compensado.

Dois fatos interessantes sobre o escalonamento produzido para Teresina-PI foram que a bateria foi carregada quase próximo ao pico de geração fotovoltaica e descarregada em parte no período intermediário e em outra parte do horário de ponta e que no dia crítico positivo (2) a fatura foi nula deixando saldo de consumo a compensar.

Figura 28 – Balanços energéticos de Teresina-PI (Zona 7, 2006) para os dois dias de teste.

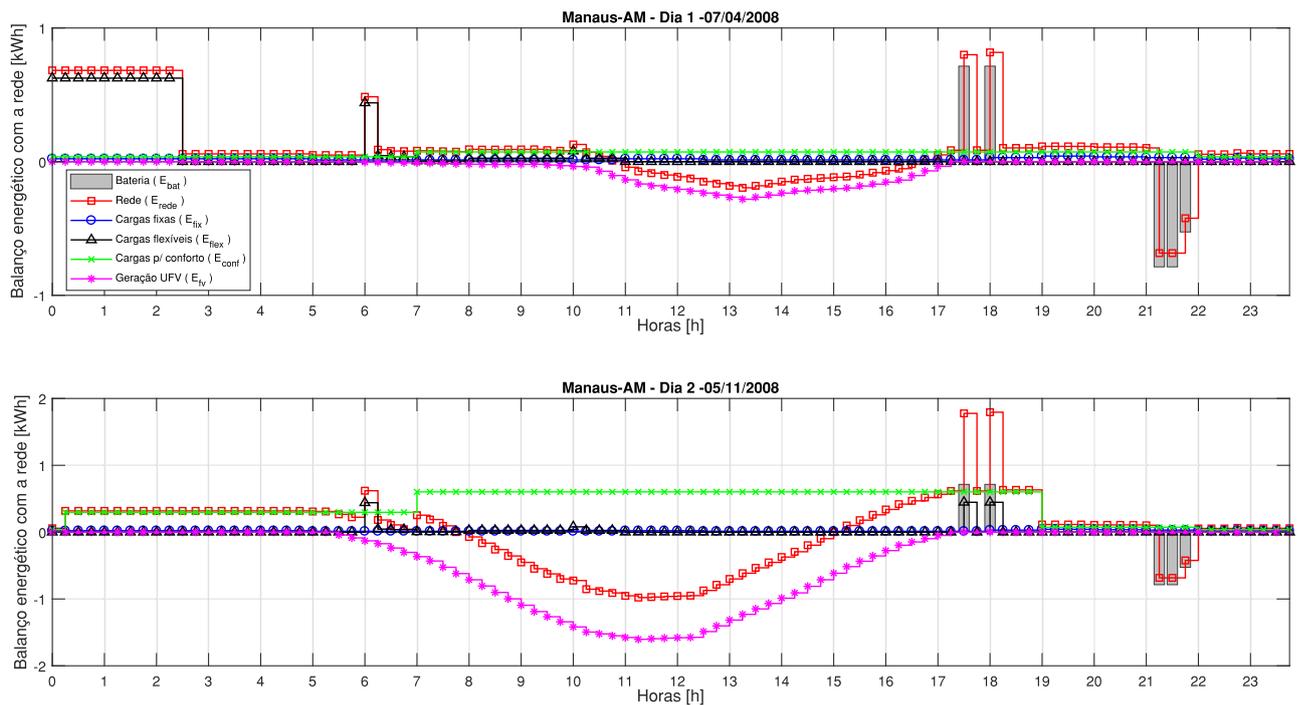


Fonte:Elaborado pelo Autor(2021).

Os escalonamentos para a cidade de Manaus-AM foram efetuados considerando no dia 1 a predominância de ventilação e no dia 2 a predominância do ar-condicionado (AC), sendo necessária em intervalo de 75 passos consecutivos (18 horas e 45 minutos). Sendo assim, todos os tipos de imposições de conforto térmico foram apresentados nas análises, de tal forma que a [Figura 29](#) ilustra o comportamento dos componentes energéticos residenciais provindos ou enviados para a rede de distribuição urbana.

Manaus-AM possui também uma geração fotovoltaica considerável até mesmo para o dia crítico negativo (1) que leva até a exportação entre as 11:00 e as 16:15. Cabe comentar na casa tanto de Manaus-AM quanto de Teresina-PI a posse de eletrodomésticos escalonáveis é menor que nas demais cidades deste estudo. Sobre o uso da bateria, fica claro que nesta aplicação a bateria injetou energia no horário de ponta para os dois dias em estudo. Ressalta-se que mesmo com alta demanda por AC, o dia 2 (positivo) o escalonamento deixou saldo de consumo a compensar.

Por meio de uma análise geral foi possível perceber que o escalonamento para cargas similares mesmo em dias diferentes não sofre tantas modificações quanto esperadas bem com a gestão da bateria residencial, esta similaridade pode ser proveniente dos parâmetros de escalonamento serem similares para os dois dias de aplicação. Estas observações levam a reforçar a importância das condições climáticas no consumo de energia elétrica residencial, bem como seu aproveitamento, cabe destacar que apenas uma cidade teve o uso do ar-condicionado considerado, ademais geralmente os dias de alta demanda por esta estratégia

Figura 29 – Balanços energéticos de Manaus-AM (Zona 8, 2008) para os dois dias de teste.

Fonte:Elaborado pelo Autor(2021).

também possuem uma geração fotovoltaica que auxilia a superar este problema.

O acionamento ou não do boiler acaba desencadeando uma diferença de valor de fatura entre os escalonamentos produzidos nos dois dias de teste, ressaltando a importância do SAS residencial com sistema auxiliar como instrumento para reduzir o consumo na ponta, haja vista que na maioria das cidades estudadas o uso do chuveiro pelo PPH-2019 (ELETROBRÁS, 2019) foi no bloco tarifário de ponta ou intermediário.

4.2.4 Análise Comparativa dos Cenários nas Oito Cidades Escolhidas

Não bastaria efetuar os escalonamentos para os dias de teste para obter informações confiáveis das vantagens em adicionar a inteligência e otimização no consumo de eletricidade nas residências. Sendo assim, a tarifa convencional possui um valor um pouco mais alto que o bloco tarifário no horário fora de ponta, entretanto dá uma liberdade maior ao consumidor, ou seja, uma satisfação maior em ligar e desligar seus aparelhos quando melhor entender.

Deve-se ressaltar que em uma aplicação do cenário inteligente e sustentável aqui proposto o consumidor seria quem parametrizaria suas preferências de uso dos aparelhos eletrodomésticos e a duração de uso e, até mesmo por isso, foi considerado o uso dos dados obtidos do PPH-2019 (ELETROBRÁS, 2019) para simular tais escolhas. A partir

das considerações apresentadas, foram planejados cenários já destacados na metodologia e enumerados de 1 a 7 que fossem equivalentes na tarifa convencional em variadas combinações de competição com o cenário inteligente e sustentável.

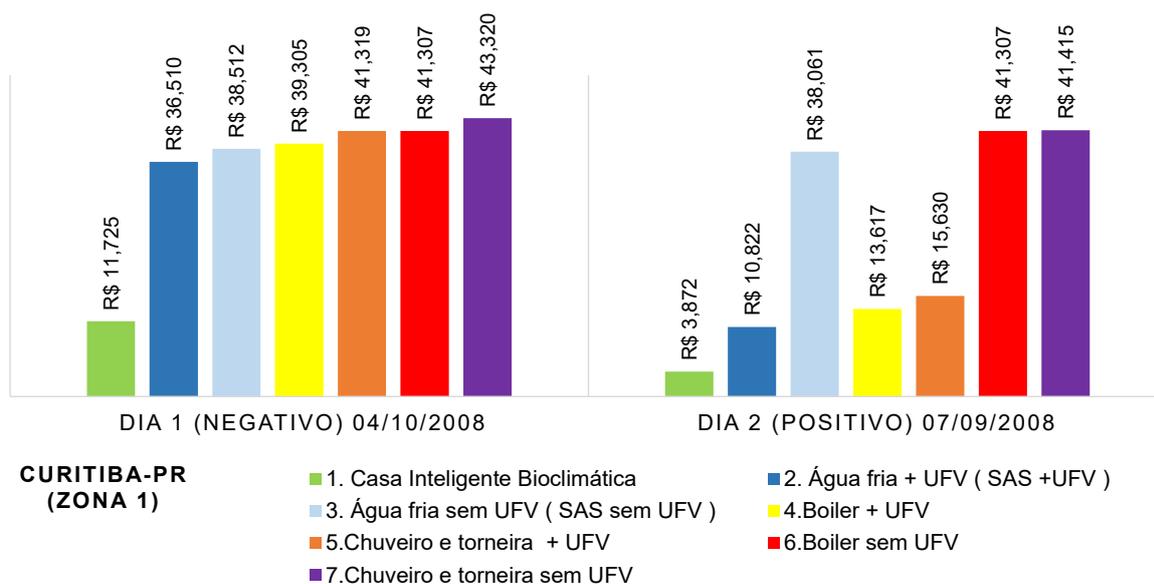
Como já frisado, o consumo de conforto de ambas as casas nos diferentes cenários foi o mesmo, ou seja, ambas residências foram concebidas com as premissas bioclimáticas, adequadas ao clima local. Dessa forma, para uma dada amostra que entre na carta bioclimática atualizada de [Givoni \(1992\)](#) para países quentes em desenvolvimento e a residência deverá ser capaz de atender a climatização com a estratégia resultante, quando o recurso natural permitir ou através do acionamento dos aparelhos de climatização ativa.

Outra ressalva importante é que os cenários 2 (SAS com UFV) e 3 (SAS sem UFV) são numericamente equivalentes ao uso de água fria, ou seja, não dispor de nenhum meio de aquecimento da água na residência, haja vista que o custo de aquecimento é nulo. Pelo próprio relatório público considerado ([ELETROBRÁS, 2019](#)) 60,23% das residências entrevistadas usam chuveiro natural sem nenhum meio de aquecimento.

No estado do Piauí cuja capital é Teresina (zona bioclimática 7) 99,74% das residências usam chuveiro com água fria e no estado Amazonas cuja capital é Manaus essa mesma variável é de 99,60%. Por outro lado em Curitiba-PR 94,87% dos moradores entrevistados possuem chuveiro elétrico, evidenciando a necessidade de alternativas que possam abranger todo o território nacional ([ELETROBRÁS, 2019](#)). Sendo assim, os resultados não poderiam deixar de trazer um comparativo com este cenário e, por isso, os cenários também foram nomeados de maneira que sinalizem a equivalência entre os cenários como “2.Água fria + UFV (UFV + SAS)” e “3.Água fria sem UFV (SAS sem UFV)”.

Portanto, a presente subseção apresenta todos os comparativos em gráficos contendo os resultados dos dois dias críticos, positivos e negativos, de cada residência inserida em cada uma das cidades nas oito zonas bioclimáticas consideradas. Sendo assim, a análise será iniciada pela apresentação dos resultados da casa inteligente bioclimática e demais cenários em gráfico de barras disposto na [Figura 30](#) para a cidade de Curitiba-PR (zona 1), com os valores obtidos no cenário principal em regime de DRP da tarifa horária branca em comparação aos demais na tarifa convencional.

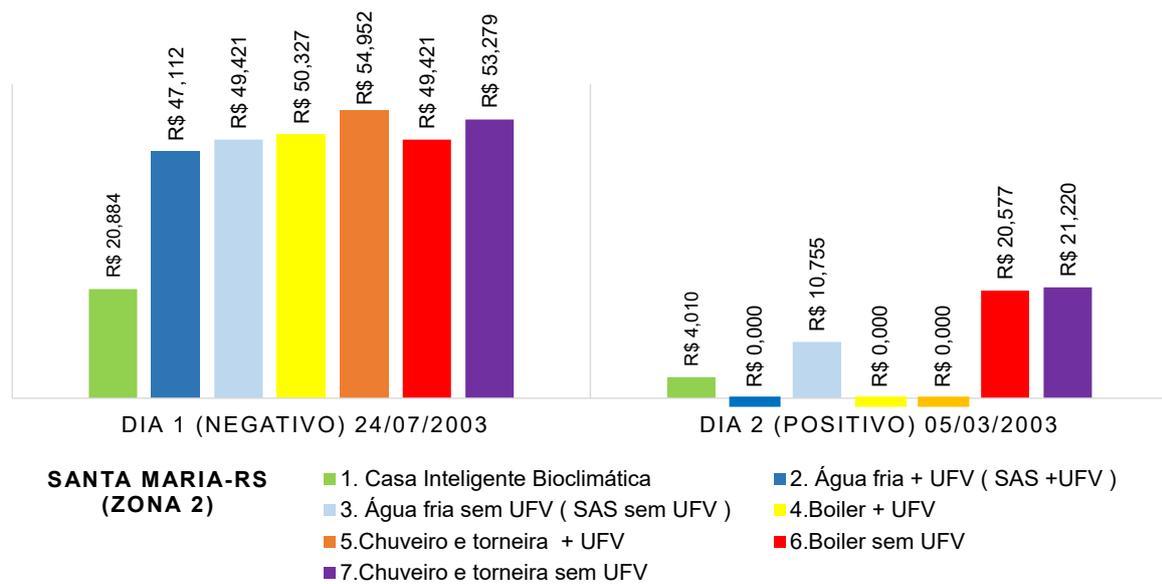
Destaca-se que para esta zona bioclimática o cenário inteligente proposto (1) foi superior nos dois dias de teste, até mesmo considerando o uso do SAS com a UFV na tarifa convencional (cenário 2) em ambos os dias críticos. Destaca-se que o cenário 1 representou apenas parcelas de 32,11% e 35,78% do preço de fatura do cenário 2, respectivamente nos dias críticos 1 e 2, sendo este cenário o de valor de fatura mais próximo. A economia do cenário 1 chegou a até 90,65% em relação ao cenário 7 que considera o uso de chuveiro e torneira para equivaler ao uso do SAS com sistema elétrico de retaguarda do cenário.

Figura 30 – Comparativo das faturas dos cenários de Curitiba-PR (Zona 1, 2008).

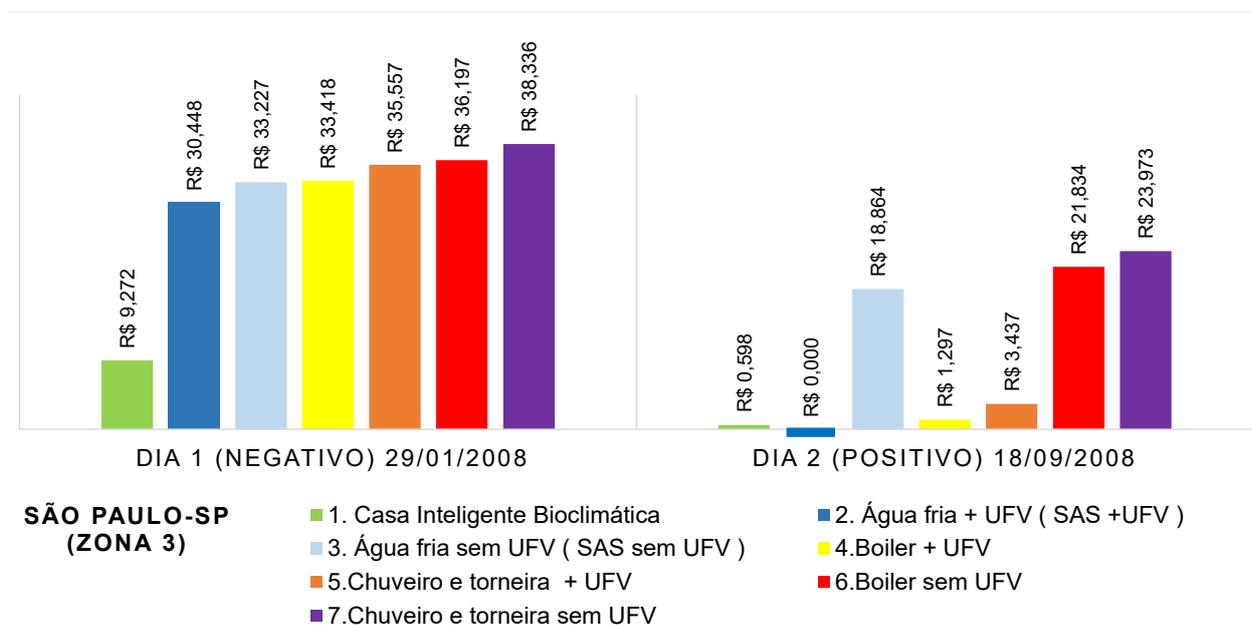
Fonte:Elaborado pelo Autor(2021).

Para a cidade de Santa Maria-RS, representante da zona bioclimática 2, segue a [Figura 31](#). No dia crítico negativo (1) a economia mínima do cenário proposto foi de 75,11% (com o cenário 2), chegando até a 78,66% em relação ao cenário 5. Por outro lado, no dia em que há um recurso solar abundante (dia 2) os cenários 2, 4 e 5, em que a UFV se faz presente com ou sem SAS, tiveram as faturas nulas deixando saldos a compensar enquanto o cenário 1 obteve o valor de R\$ de 4,010. Para este dia o cenário inteligente teve um desempenho pior, entretanto vale destacar que um dia de preço da tarifa no cenário sem sol é capaz de pagar aproximadamente 11 dias do cenário inteligente e sustentável, sabendo que o clima de Santa Maria-RS, por ser uma das regiões bioclimáticas mais frias, certamente ocorreram muitos dias críticos negativos de tal forma que em uma análise considerando o horizonte anual ainda assim, o cenário 1 seria vantajoso. Os cenários que tiveram suas faturas zeradas ficaram, desse modo, dependentes da disponibilidade solar para terem um desempenho superior ao cenário principal, demonstrando assim certa fragilidade não observada no cenário 1.

Para a zona 3 representada pela cidade de São Paulo-SP a economia mínima foi de R\$ 21,176 (69,555%) para o dia 1 em relação ao cenário 2 com uso de água fria, haja vista que neste dia os recursos de aquecimento solar são insuficientes conforme se observa em [Figura 32](#). De acordo com [Eletrobrás \(2019\)](#), para o estado de São Paulo 97,03% dos residentes responderam que possuem chuveiro elétrico e apenas 0,53% usam água fria, sendo assim, o uso de chuveiro elétrico é uma necessidade de conforto para os residentes desta cidade. Dessa forma, a economia do cenário 1 em relação ao cenário mais barato que considera o aquecimento da água foi de 72,25% (cenário 4) com uso do *boiler* e UFV.

Figura 31 – Comparativo das faturas dos cenários de Santa Maria-RS (Zona 2, 2003).

Fonte: Elaborado pelo Autor(2021).

Figura 32 – Comparativo das faturas dos cenários de São Paulo-SP (Zona 3, 2008).

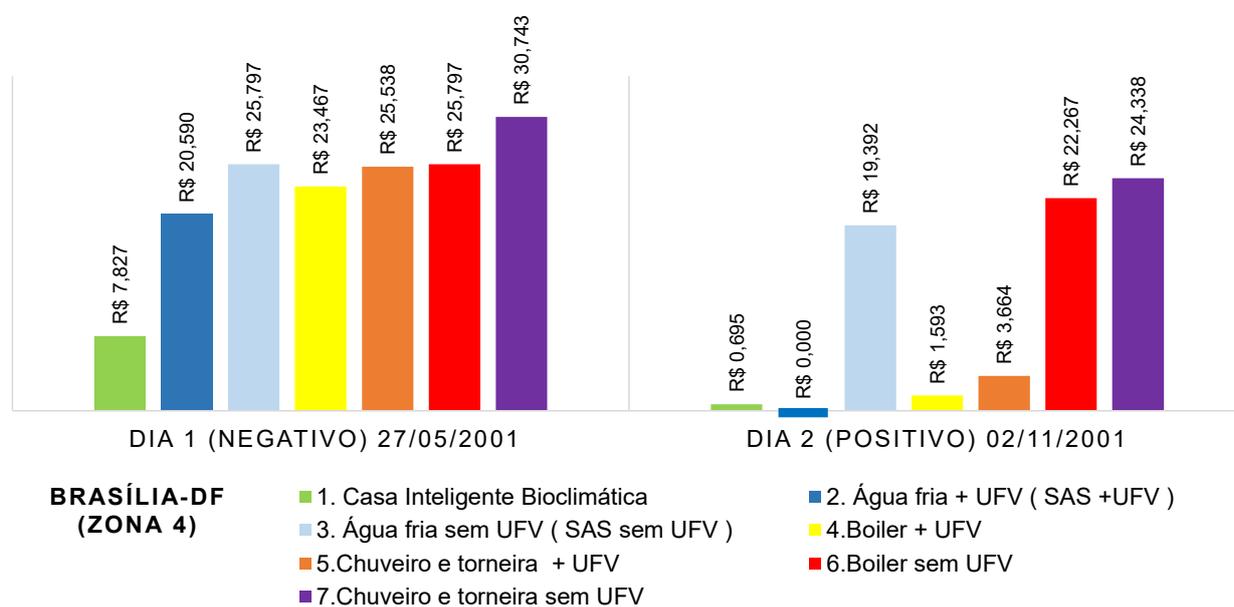
Fonte:Elaborado pelo Autor(2021).

Já para o dia 2 na cidade de São Paulo a casa inteligente bioclimática obteve valor maior de fatura diária que o uso do SAS com UFV (cenário 2), que foi nulo, haja vista que neste dia há sol para aquecer a água e uma ótima geração fotovoltaica. Entretanto o valor da fatura diária do cenário 1 foi de apenas R\$ 0,598, sendo assim, um dia crítico negativo em que seria necessário o uso de *boiler* (cenário 4) pode pagar até aproximadamente 51 dias de cenário 1 com disponibilidade de energia solar. Em relação aos demais cenários o

cenário 1 foi ligeiramente mais econômico que o cenário 4 (R\$ 0,699 de economia, 53,91%) e consideravelmente mais econômico que o cenário 5 (R\$ 2,839 de economia, 82,6%) e depois economizando no mínimo 96,83% (cenário 2).

A cidade de Brasília-DF (zona bioclimática 4) apresentou desempenho similar a São Paulo-SP, conforme a [Figura 33](#). No dia 1 novamente o cenário 1 foi dominante com economia mínima de aproximadamente 62% em relação ao uso da água fria. Entretanto no dia 2 apenas o cenário 2 foi capaz de superá-lo apresentando uma fatura nula, o cenário 1 superou os cenários de *boiler* com UFV (4) e chuveiro e torneira elétrica com UFV (5), com economias de, respectivamente, 56,38% e 81,04%.

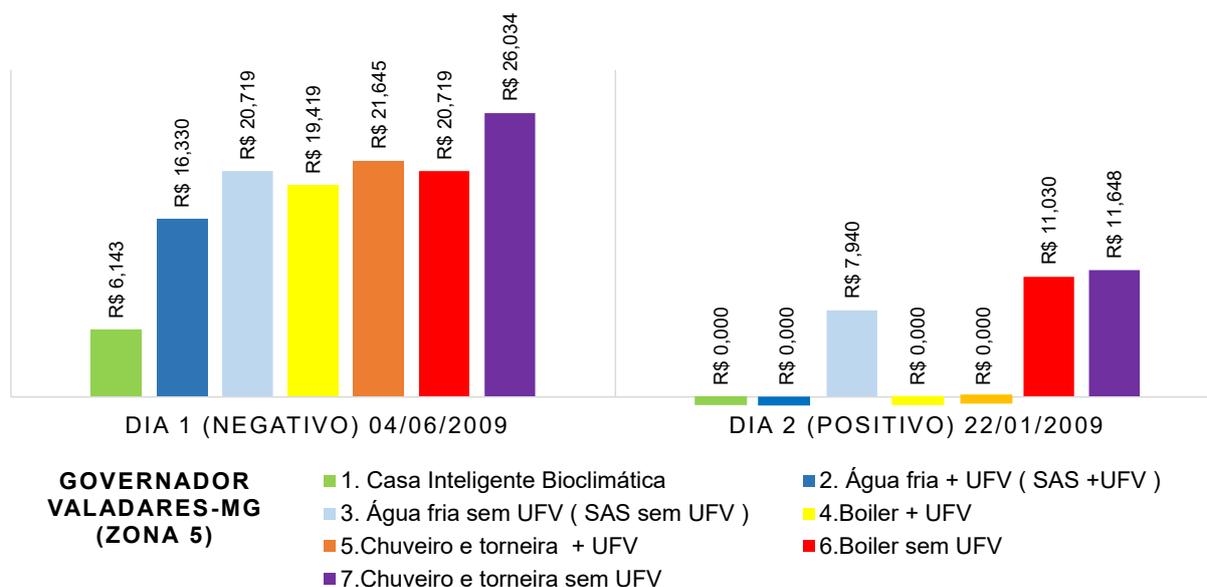
Figura 33 – Comparativo das faturas dos cenários de Brasília-DF (Zona 4, 2001).



Fonte:Elaborado pelo Autor(2021).

A aplicação do escalonamento em 24 passos de Brasília-DF apresentou dias com faturas nulas, entretanto naquele contexto a quantidade de cargas era maior e eram dias passivos, ou seja, de custo zero para a manutenção do conforto térmico. Sendo assim, na capital do Brasil o escalonamento foi dominante em diferentes cenários e passos de escalonamento, sendo desse modo, uma localidade segura para se considerar a implantação do cenário proposto.

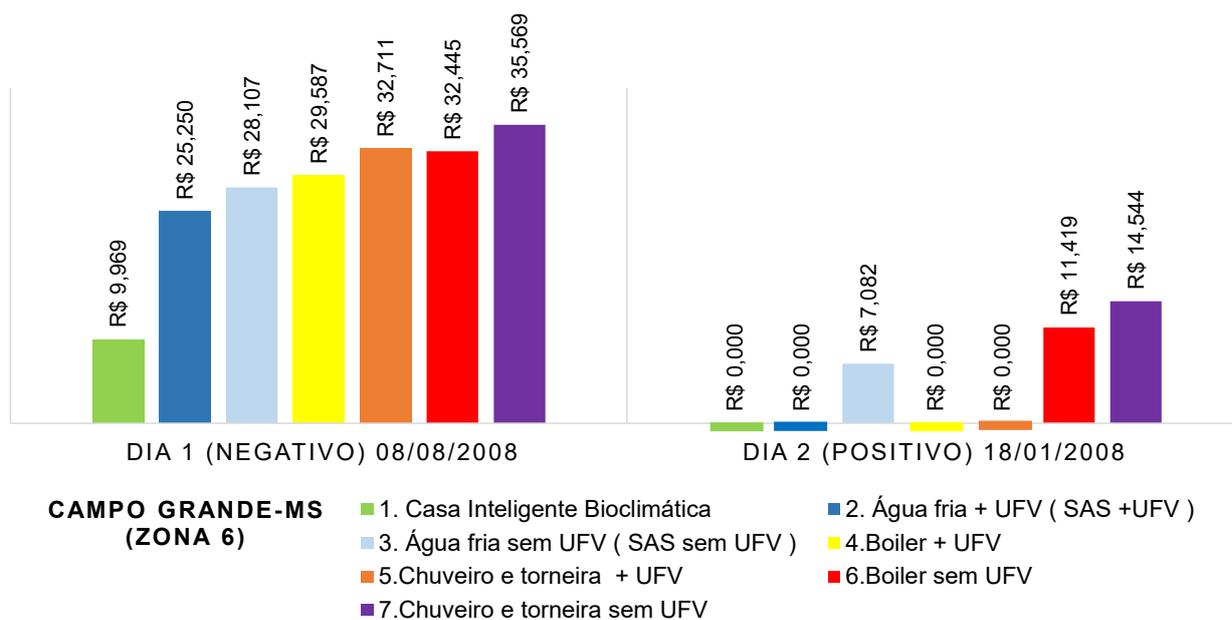
Em Governador Valadares-MG (zona 5) a economia mínima foi de 52,07% e máxima de 69,94% para o dia crítico 1 de acordo com a [Figura 34](#), apresentando um desempenho consideravelmente inferior aos demais cenários que as cidades anteriormente analisadas para o mesmo dia equivalente delas. Entretanto para esta cidade uma situação interessante ocorreu no dia 2, uma vez que todos os cenários com geração fotovoltaica tiveram suas faturas zeradas, cabendo uma análise melhor quando forem oportunamente explicitados os saldos de consumo energético a serem compensados na próxima subseção ([subseção 4.2.5](#)).

Figura 34 – Comparativo das faturas dos cenários de Governador Valadares-MG (Zona 5, 2009).

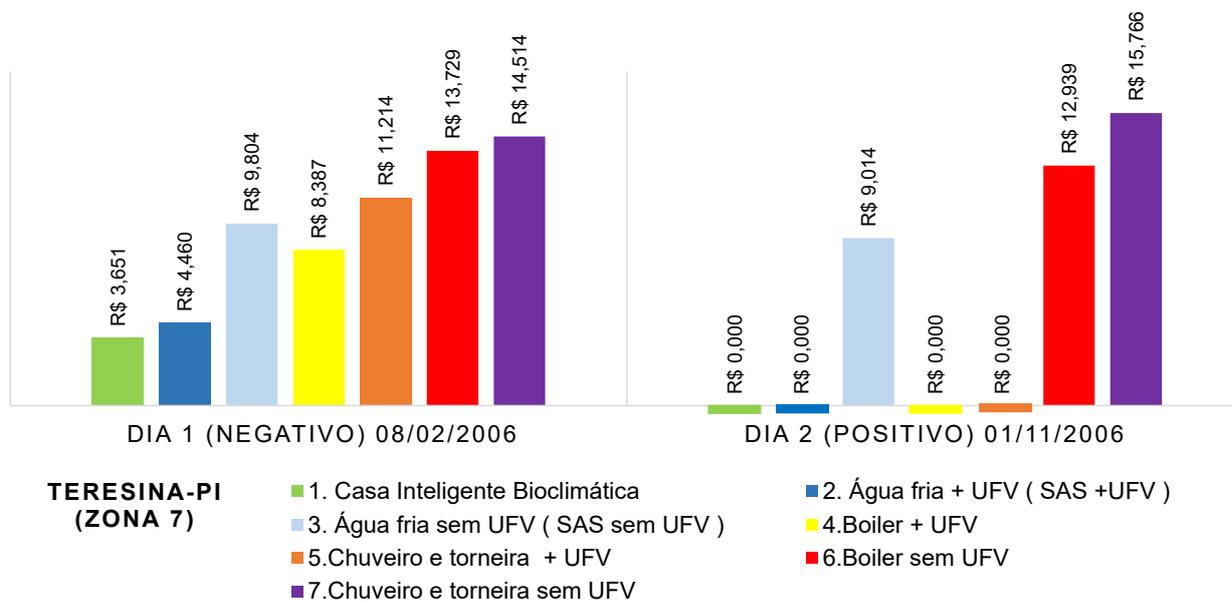
Fonte:Elaborado pelo Autor(2021).

Como pode ser visto na [Figura 35](#), na cidade de Campo Grande-MS, representante da sexta zona bioclimática, ocorreu uma situação similar a Governador Valadares-MG. No dia crítico 1, o cenário principal obteve economia percentual mínima de 69% em relação ao cenário 2, sabendo que no estado de Mato Grosso do Sul 77,18% dos habitantes pesquisados utilizam chuveiro elétrico. Assim, a economia mínima derradeira seria de 73,55 % (em relação ao cenário 4) e a economia máxima obtida foi de 78% em relação ao uso do chuveiro sem UFV que é o cenário predominantes dentre as casas pesquisadas nesse estado, sendo que apenas 0,16% dos residentes declarou possui geração própria no domicílio ([ELETROBRÁS, 2019](#)).

Para a cidade de Teresina-PI, conforme [Figura 36](#), o cenário 1 foi dominante no dia crítico negativo (1), entretanto obteve uma economia mínima baixa de 18,3% em relação ao cenário 2, onde considera-se o uso de água fria com geração fotovoltaica, entretanto nenhum dos residentes entrevistados do estado do Piauí responderam possuir geração própria de eletricidade, contrariando a premissa mais relevante deste cenário segundo [Eletrobrás \(2019\)](#). Conforme já destacado, apesar do dia crítico negativo possuir baixa radiação total diária em comparação a média da localidade a geração fotovoltaica foi capaz de auxiliar a redução do consumo neste dia, como exemplo disto o cenário 4, onde o *boiler* é considerado sem o uso do SAS, mas associado com a UFV foi obtida economia maior que o cenário 3 (água fria sem UFV), situação peculiar também observadas nos dia 1 de Brasília-DF e Governador Valadares-MG, mas mais acentuada em Teresina-PI com economia de R\$ 1,417 do cenário 4 em relação ao 3.

Figura 35 – Comparativo das faturas dos cenários de Campo Grande-MS (Zona 6, 2008).

Fonte:Elaborado pelo Autor(2021).

Figura 36 – Comparativo das faturas dos cenários de Teresina-PI (Zona 7, 2006).

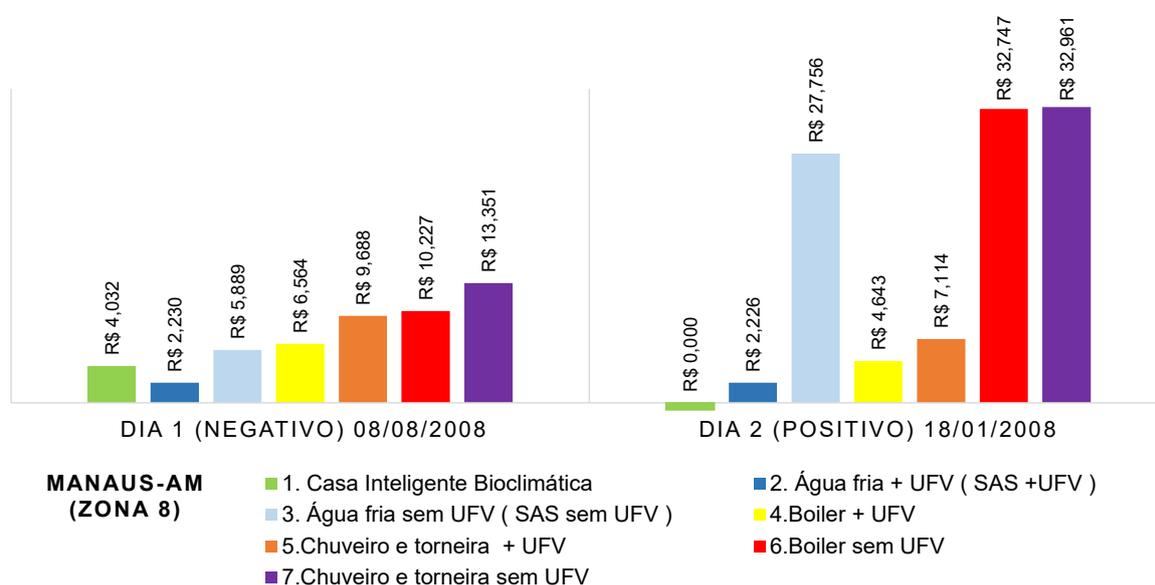
Fonte:Elaborado pelo Autor(2021).

Ainda sobre os escalonamentos obtidos de Teresina-PI, no dia crítico positivo (2) todos os cenários com geração fotovoltaica obtiveram fatura diária nula, o que reforça o alto potencial de geração de energia fotovoltaica nesta cidade. Sendo assim, caberá ainda uma análise de compensação póstuma para este dia específico.

Uma situação inusitada ocorreu na casa e cenários para a cidade de Manaus-AM, através de [Figura 37](#) percebe-se que no dia crítico negativo o cenário 2 teve um custo

menor que o cenário principal, isto ocorre por uma junção de fatores. O consumo diário das cargas escalonáveis é baixo (942,3 Wh) que somados a cargas fixas (1,88 kWh) e a potência para manter o conforto (5,664 kWh) resulta em aproximados 8,486 kWh que abatida pela geração fotovoltaica de 5,278 kWh resultou em 3,208 kWh absorvido da rede, sendo que nenhum mecanismo de aquecimento de água foi considerado neste cenário. De forma similar a Teresina-PI, na cidade de Manaus-AM apenas 0,16% dos entrevistados responderam que possuem geração própria, embora a maioria utilize chuveiro com água fria, como já mostrado também (ELETROBRÁS, 2019). Sendo assim o cenário 1 superou os demais com economia que variou entre 31,53% com o cenário 3 e máxima de 69,8% do cenário 7, com chuveiro e torneira elétricos sem UFV.

Figura 37 – Comparativo das faturas dos cenários de Manaus-AM (Zona 8, 2008).



Fonte:Elaborado pelo Autor(2021).

O escalonamento em Manaus-AM obteve um resultado interessante no dia crítico positivo sendo o único cenário a ter fatura diária zerada, até mesmo em comparação ao cenário 2 que considera o uso do SAS com a UFV. Com este valor de fatura diária zerada no dia 2, a economia financeira do cenário principal em relação aos demais será exatamente o valor da fatura deles.

Diante dos achados, o esquema proposto e testado de escalonamento se mostrou mais robusto frente a variações climáticas e mais seguro, uma vez que garante os banhos em água quente e o conforto térmico. Diferente da literatura correlata estudada essa proposta se mostrou inovadora por considerar estratégias de climatização passivas e de custos menores em relação aos que consideram unicamente sistemas centrais ou distribuídos de ar-condicionado ou de aquecimento como comumente aplicado em alguns países, entretanto a realidade brasileira é utilizar uma climatização distribuída e com diferentes estratégias

de menores custos energéticos.

As comparações aqui dispostas podem servir de diretrizes preliminares para avaliação do oferecimento de incentivos por parte das prefeituras das cidades estudadas para a construção de residências bioclimáticas ou reformas e adaptações nas já construídas para atender as condições aqui tidas como premissas, bem como a adesão ao DRP estudado pela população. Ademais a proposta destaca um comparativo entre as casas adequadamente concebidas, uma vez que se a edificação não possuir os parâmetros de isolamentos, aberturas e proteções solares adequadas em seu envelope construtivo não será capaz de corresponder as estratégias obtidas da entrada das amostras climáticas na carta bioclimática considerada nesta tese. Portanto, se o comparativo fosse com residências comumente aplicadas os resultados a favor do cenário proposto poderiam ser ainda melhores.

4.2.5 Compensações de Consumo de Energia Elétrica nas Oito Cidades Escolhidas

O processo de compensação do consumo de energia elétrica exportada para a rede é vantajoso ao cliente, conforme já destacado, mesmo que atualmente o governo permita aos consumidores vender seu excedente de geração conforme a lei que recentemente entrou em vigência com a sanção do governo federal (BRASIL, 2022). Entretanto, conforme já explicado na subseção 4.1.4, o regime de compensação é mais vantajoso ao consumidor e por esse motivo este trabalho parte da premissa de entrada do consumidor em regime de compensação.

No caso da tarifa convencional o saldo de energia ativa a ser compensado é simplesmente o que foi excedido a rede. Este caso ocorreu apenas para a tarifa convencional em alguns cenários estudados do dia crítico positivo (2) para as cidades de Santa Maria-RS, São Paulo-SP e Brasília-DF, evidente que apenas nos casos em que há geração própria (UFV).

Partindo da consideração do dia crítico positivo (2), no caso de Santa Maria-RS, o cenário 2 (SAS com UFV ou água fria com UFV) deixou um saldo de 23,9 kWh a ser compensado, já o cenário 4 (UFV com *boiler* sem SAS) deixou um saldo de 18,9 kWh e o cenário 5 (UFV com chuveiro e torneira) deixou 17,9 kWh. Usando os dados da fatura mensal máxima média obtida do PPH-2019 para o mês de dezembro no estado do Rio Grande do Sul, de 229,49 kWh/mês (ELETROBRÁS, 2019), sendo este o valor também considerado para dimensionar a UFV (E_m). Considerando um número médio de dias por mês de 30,4 o consumo diário médio resultaria em 7,55 kWh/dia fazendo com que a compensação seja de aproximadamente 3 dias e 4 horas em média para o cenário 2, 2 dias e 12 horas para o cenário 4 e 2 dias e 9 horas no cenário 5. Isso demonstra como os dias de abundância de energia solar são favoráveis aos consumidores geradores e suas

compensações de energia elétrica.

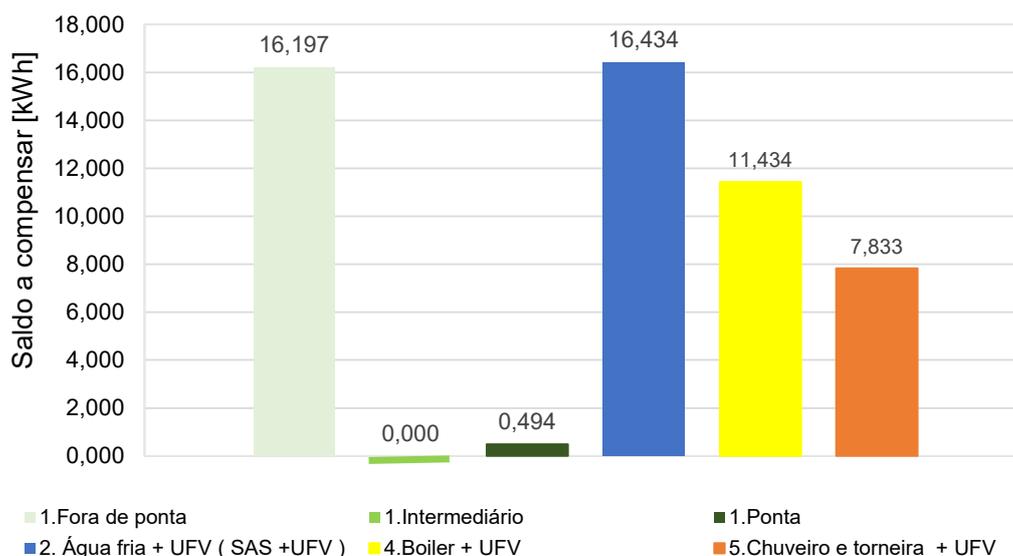
Nas cidades de São Paulo-SP e Brasília-DF o único dia que deixou saldo a compensar também foi o dia crítico positivo e em ambos o cenário 2 foi o que ocorreu este fenômeno. Considerando as premissas de E_m de 184,44 kWh/mês para São Paulo-SP, com cálculo similar ao efetuado para Santa Maria-RS, o saldo de 2,8 kWh seria capaz de compensar o consumo média de 11 horas de um dia. Já em Brasília-DF o saldo de 2,2 kWh para o cenário 2 do dia 2 considerando um E_m de 164,41 kWh/mês, este saldo seria capaz de compensar um consumo médio de quase 8 horas de um dia.

Cabe comentar que o objetivo do escalonamento é único, minimizar a fatura de energia elétrica diária, sendo assim, o excedente ocorre quando o valor resultante da tarifa é negativo, deste modo, como o consumidor não recebe o valor que pagaria da energia elétrica os resultados foram readequados para determinar o saldo a compensar em cada bloco tarifário. Tal cálculo de compensação é efetuado com a série diária do resultante na rede somando os saldos dos passos dos blocos tarifários entre si. Isto posto, as cidades que tiveram a fatura zerada com o símbolo “(*)” na [Tabela 23](#) decorreram em saldos compensatórios que serão no decorrer do texto apresentados.

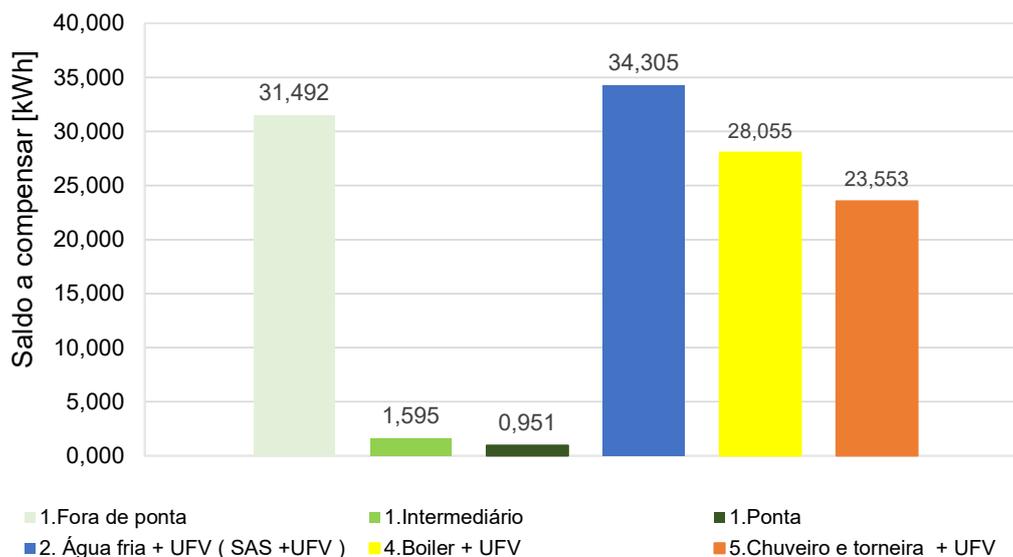
Destacando que as compensações tarifárias só ocorreram nos dias críticos positivos (dias 2 de cada cidade) a apresentação inicia-se com a cidade de Governador Valadares-MG (zona 5) conforme a [Figura 38](#). A compensação fora de ponta do cenário inteligente e sustentável teve um valor de 16,197 kWh, com mesmo patamar da compensação do cenário 2 (SAS com a UFV, equivalente a água fria com UFV) de 16,434 kWh, ficando ainda com um saldo de 0,494 kWh a compensar na ponta, os demais cenários seguiram com compensações de 11,434 kWh (cenário 4) e 7,833 kWh (cenário 5). Desta forma, o montante em kWh a compensar maior foi do cenário inteligente e sustentável em relação aos demais.

Na cidade de Campo Grande-MS os saldos a compensar são apresentados na [Figura 39](#). Neste caso a compensação do cenário 2 foi superior em 813 Wh que o saldo a ser compensado no período fora de ponta do cenário 1 (principal), o montante de compensação do cenário 1 de 34,038 kWh ainda não foi capaz de superar a compensação do cenário 2 (34,305 kWh), mas superou o saldo do cenário 4 em 5,983 kWh e o do cenário 5 em 10,485 kWh. Interessante notar que ocorreu compensação em todos os blocos, 1,595 kWh no intermediário e 905 Wh na ponta, isso só é possível devido a presença da bateria, haja vista que a geração fotovoltaica no horário intermediário não é tão alta e geralmente o horário de ponta ocorre no período noturno.

No caso específico de Campo Grande-MS ocorreu um período com baixa geração fotovoltaica na ponta, pois o início deste bloco tarifário é as 17:30 horas e uma geração residual de 107 Wh até o anoitecer ocorreu em acordo com o modelo empregado. O fator determinante para este saldo no horário de ponta foi decorrente de duas descargas da

Figura 38 – Saldos a compensar de cenários no dia 2 de Governador Valadares-MG (Zona 5, 2009).

Fonte:Elaborado pelo Autor(2021).

Figura 39 – Saldos a compensar de cenários no dia 2 de Campo Grande-MS (Zona 6, 2008).

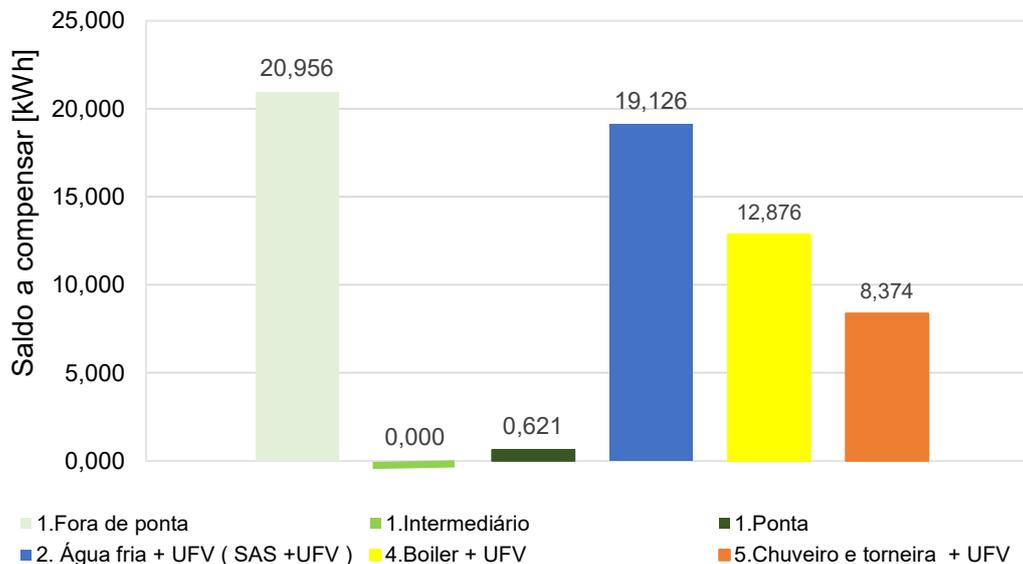
Fonte:Elaborado pelo Autor(2021).

bateria de 787 Wh e uma de 526 Wh das 18:15 às 19:00, lembrando que há sempre algum consumo de cargas fixas durante o dia.

Conforme visualizado na [Figura 40](#) o dia crítico positivo de Teresina-PI apresentou montante de saldo a compensar em kWh maior para o cenário 1 com 21,577 kWh totais, com uma parcela mínima de 0,621 kWh a ser compensado na ponta e nada no período intermediário. O cenário 2 foi mais uma vez o cenário com maior saldo a compensar, demonstrando as vantagens de aplicação do SAS na economia energética residencial, sendo que em todos os saldos de compensação o cenário com *boiler* e UFV (cenário 4) superou o

cenário de chuveiro e torneira elétrica com UFV (cenário 5).

Figura 40 – Saldos a compensar de cenários no dia 2 de Teresina-PI (Zona 7, 2006).



Fonte:Elaborado pelo Autor(2021).

Por fim para a cidade de Manaus-AM só ocorreu compensação para o cenário 1 e todo o saldo de compensação foi no horário de ponta recorrendo ao balanço energético do dia 2, anteriormente disposto na [Figura 28](#), percebe-se que entre as 17:15 as 18:00 a rede exportou 3 descargas de bateria, duas de 787 Wh e mais uma de 526 Wh. Mesmo havendo exportação para a rede no horário fora de ponta o balanço deste bloco foi positivo, ou seja, ocorreu consumo de energia elétrica oriunda da rede.

Diante dos resultados percebe-se que dependendo da situação o escalonamento pode também deixar saldos a compensar de energia elétrica. Também foram percebidas as vantagens do aproveitamento abrangente da energia solar, uma vez que os cenários com SAS e UFV nos dias de disponibilidade de sol dominaram os demais na tarifa convencional. Ademais o aproveitamento do sol como agente de aquecimento ambiental acarretou a vantagem de dispensar o aquecimento artificial quando oportuno.

Capítulo 5

Conclusões

No contexto da sustentabilidade urbana, na qual se fazem presentes as residências em estudo, este trabalho foi pautado na inclusão e atenção aos aspectos ambientais, haja vista que a redução de uso energético no horário de ponta e o aproveitamento de recursos renováveis acarretam necessariamente menor degradação ambiental. Além disso, a proposta também presta atenção a questão econômica uma vez que a função objetivo do escalonamento busca minimizar a fatura do consumidor e auxilia a concessionária tanto reduzindo seu consumo no horário de ponta onde a energia elétrica é mais cara quanto fornecendo energia oportunamente a rede, estabelecendo assim uma relação ganha-ganha entre concessionária e consumidor.

Além do já exposto, a proposta também mergulha em aspectos sociais quando considera as particularidades sociais de cada região em que se propôs estudar, com dados oriundos de pesquisa socioeconômica e energética (ELETROBRÁS, 2019). Dessa forma, a estrutura proposta envolve os três aspectos da sustentabilidade, levando em conta diferentes cidades e pode servir de subsídios para tomada de decisões em busca de um uso racional da energia elétrica, concepção adequada das edificações e melhor aproveitamento dos recursos naturais.

A partir dos resultados encontrados, foi percebido como o escalonamento do consumo pode ser eficiente, até mesmo na casa bioclimática, onde a demanda por climatização seria menor que em uma aplicação em uma edificação que não fosse adequadamente projetada para tal. Foram obtidos até 100% de economia na fatura de energia elétrica, deixando saldo a compensar máximo de 31,492 kWh no horário fora de ponta para o dia crítico com abundância de energia solar para a cidade de Campo Grande-MS.

Para a proposta aqui desenvolvida e apresentada, foram necessárias simplificações inseridas sem prejuízo dos resultados obtidos, tais como considerar que os profissionais responsáveis pela concepção das residências as projetariam e executariam de maneira adequada ao clima local. Para isso, não apenas os materiais empregados deveriam ser

adequados no envelope construtivo, mas também as aberturas, proteções solares, áreas envidraçadas ou outras particularidades oportunas dependendo da zona bioclimática em questão. Outras premissas consideradas são as escolhas adequadas dos eletrodomésticos, buscando equipamentos de maiores rendimentos energéticos, e dimensionando-os adequadamente ao trabalho que iriam exercer nas residências, a exemplo dos dispositivos de climatização.

Ademais, a carta bioclimática, sendo um instrumento comumente aplicado para o projeto das edificações com base nas condições climáticas externas, foi oportunamente readequada para a operação da climatização natural e/ou artificial no interior das residências. Essa aplicação possibilitou o emprego da carta como mecanismo de suporte a decisão no interior da residência que trabalhou paralelamente em conjunto com o algoritmo de otimização para escalonar o consumo de energia elétrica.

A dinâmica da gestão residencial demonstrou o papel primordial dos recursos renováveis na presente proposta, através dos impactos do uso do SAS, da UFV de microgeração e do aproveitamento da energia solar como fonte de calor para exercer aquecimento ambiental da residência. Com o avanço da tecnologia e dos medidores inteligentes, os programas de DR serão cada vez mais presentes e disponíveis para aplicação e neste contexto a gestão residencial ocupará papel fundamental de auxiliar o ser humano a aproveitar da melhor maneira possível os recursos disponíveis.

O trabalho aqui apresentado teve como consequência prestigiar uma produção de edificações mais sustentáveis com menor custo energético, valorizando devidamente o trabalho dos arquitetos, engenheiros e construtores em busca de uma melhor relação do clima com a edificação.

5.1 Proposição de Trabalhos Futuros

Diante das questões abordadas neste trabalho, uma série de oportunidades de pesquisa surgem como maneira a completar os resultados aqui encontrados, sendo assim, podem-se destacar as seguintes ações de pesquisa:

- Experimentar por meio de simulação computacional ou medições em edificações existentes, se realmente as estratégias obtidas a partir da entrada de amostras climáticas na carta bioclimática podem manter o conforto térmico;
- Considerar um ambiente simulado de controle de estratégias passivas e ativas, bem como a automação de janelas, persianas, aberturas e *brises* que trabalhem em conjunto com o escalonamento baseado no modelo elaborado;

- Incluir outras fontes de energia nas residências, tais quais o biogás proveniente do lixo residencial, o hidrogênio ou pequenos geradores eólicos;
- Aplicar o mecanismo de escalonamento para os eletrodomésticos em um conjunto de residências a fim de compará-los com o consumo real tendo como meta a redução de pico e preenchimento de vales da curva de carga de uma rede de distribuição urbana ou um transformador que atende a várias unidades consumidoras;
- Efetuar medições a níveis de entrada de vento nas edificações para verificar o aproveitamento para ventilação natural de maneira adequada e incluí-lo no escalonamento como estratégia passiva;
- Pesquisar, frente a dados do PPH-2019 (ELETROBRÁS, 2019), os materiais empregados na maior parte das residências para simular residências típicas para cada zona bioclimática, testando-as e estabelecendo linhas para execuções de *retrofit* nelas;
- Desenvolver modelo multiobjetivo que possa maximizar o conforto e minimizar o custo da fatura de energia elétrica tomando como referência o patamar mínimo exigido pela carta bioclimática e diferente índices de conforto mais convenientes ao tipo de estratégia aplicada;
- Desenvolver avanços no mecanismo aqui elaborado para um problema de otimização de horizonte de tempo rolante, misturando decisões de acionamento dos moradores para reagendar o consumo dos aparelhos eletrodomésticos para os passos adiante;
- Efetuar análises de sensibilidade variando parâmetros dos sistemas de UFV e bateria para verificar as relações destas variações nos resultados aqui obtidos;
- Estudar as necessidades construtivas das edificações para as cidades e os dias aqui estudados e simulá-las para verificação de atendimento ou não das condições de conforto térmico.

5.2 Trabalhos Publicados e em Fase de Submissão

Até o presente momento, foram publicados 4 trabalhos oriundos desta pesquisa, sendo 3 em conferências nacionais e 1 em periódico internacional:

FONSECA, A. L. A.; FERNANDES, R. A. S.; MONTEIRO, R. V. A. Estudo de Imposições de Conforto Térmico em Programas de Gerenciamento pelo Lado da Demanda. *XI Congresso Brasileiro de Planejamento Energético (CBPE)*, 2018.

FONSECA, A. L. A.; FERNANDES, R. A. S.; TEIXEIRA, B. A. N. Proposta de indicador de sustentabilidade urbana-municipal relacionado ao consumo eletricidade

que detecte ações de resposta à demanda. *II Simpósio Nacional de Gestão e Engenharia Urbana*, 2019.

FONSECA, A. L. A.; CAVALCA, D. L.; PEREIRA JUNIOR, B. R.; FERNANDES, R. A. S. Escalonamento otimizado para consumo de eletricidade residencial inteligente e sustentável no cenário de tarifa horária branca com imposições mínimas de conforto térmico. *XII Congresso Brasileiro de Planejamento Energético (CBPE)*, 2020.

FONSECA, A. L. A.; CHVATAL, K. M. S.; FERNANDES, R. A. S. Thermal comfort maintenance in demand response programs: A critical review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, v. 141, p. 110847, 2021.

Há ainda dois trabalhos em fase de submissão para periódicos internacionais, a saber:

FONSECA, A. L. A.; SPAVIERI, G.; CHVATAL, K. M. S.; FERNANDES, R. A. S.; VALE, Z. A. Electricity Consumption Scheduling for Demand Response Programs: A Novel Approach for Bioclimatic Smart Homes. *IEEE Access*.

FONSECA, A. L. A.; SPAVIERI, G.; LOPEZ, J. C.; CHVATAL, K. M. S.; FERNANDES, R. A. S.; Bioclimatic energy management system in different Brazilian cities: An approach with comprehensive use of solar energy. *Journal of Cleaner Production*.

Referências

ABNT. **NBR 15220- Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social (Associação Brasileira de Normas Técnicas)**. Rio de Janeiro, 2005. 30 p.

_____. **NBR 15569: Sistema de aquecimento solar de água em circuito direto — Requisitos de projeto e instalação (Associação Brasileira de Normas Técnicas)**. Rio de Janeiro, 2021. 42 p.

AFFONSO, C. M.; SILVA, R. V da. Demand Side Management of a Residential System using Simulated Annealing. **IEEE Latin America Transactions**, v. 13, n. 5, p. 1355–1360, maio 2015. ISSN 1548-0992. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7111989/>>.

AGHNIAEY, S.; LAWRENCE, T. M. The impact of increased cooling setpoint temperature during demand response events on occupant thermal comfort in commercial buildings: A review. **Energy and Buildings**, v. 173, p. 19–27, ago. 2018. ISSN 03787788. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778817338719>>.

ALIMOHAMMADISAGVAND, B. et al. Influence of energy demand response actions on thermal comfort and energy cost in electrically heated residential houses. **Indoor and Built Environment**, v. 26, n. 3, p. 298–316, mar. 2017. ISSN 1420-326X, 1423-0070. Number: 3. Disponível em: <<http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1420326X15608514>>.

ALLEN, E. **Como os edificios funcionam: a ordem natural da arquitetura**. 1. ed. São Paulo: WMF Martins Fontes, 2011. ISBN 978-85-7827-423-8.

ALTOé, L. et al. Políticas públicas de incentivo à eficiência energética. **Estudos Avançados**, v. 31, n. 89, p. 285–297, abr. 2017. ISSN 0103-4014. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142017000100285&lng=pt&tlng=pt>.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, dez. 2013. ISSN 0941-2948. Disponível em: <http://www.schweizerbart.de/papers/metz/detail/22/82078/Koppen_s_climate_classification_map_for_Brazil?af=crossref>.

ANEEL. **Resolução Normativa 482 - ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica)**. Brasília, 2012.

_____. **Resolução Normativa 687 - ANEEL**(Agência Nacional de Energia Elétrica). Brasília, 2015.

_____. **Resolução Normativa 733 - ANEEL**(Agência Nacional de Energia Elétrica). Brasília, 2016.

_____. **Postos Tarifários - ANEEL**(Agência Nacional de Energia Elétrica). 2021. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/postos-tarifarios>>.

_____. **Ranking das Tarifas - ANEEL**(Agência Nacional de Energia Elétrica). 2021. Disponível em: <<https://aneel.gov.br/ranking-das-tarifas>>.

ANVARI-MOGHADDAM, A.; MONSEF, H.; RAHIMI-KIAN, A. Optimal Smart Home Energy Management Considering Energy Saving and a Comfortable Lifestyle. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 6, n. 1, p. 324–332, jan. 2015. ISSN 1949-3053, 1949-3061. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6895131/>>.

ANWAR, M. B. et al. Harnessing the Flexibility of Demand-Side Resources. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 10, n. 4, p. 4151–4163, jul. 2019. ISSN 1949-3053, 1949-3061. Number: 4. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8395387/>>.

ASHRAE. **ANSI/ASHRAE Standard 55-2013: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers), 2013. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=eiCLnQAACAAJ>>.

_____. **2017 ASHRAE handbook: Fundamentals : SI edition** (American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers). Atlanta, GA: ASHRAE, 2017, ©2017, 2017. OCLC: 1030302297. ISBN 978-1-939200-58-7 978-1-939200-57-0.

ASHRAE. **ASHRAE 55: Thermal environmental conditions for human occupancy**. [S.l.], 2017. Volume: 145.

BALFOUR, J.; SHAW, M.; NASH, N. B. **Introdução ao projeto de sistemas fotovoltaicos**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

BEAUDIN, M.; ZAREIPOUR, H. Home energy management systems: A review of modelling and complexity. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 45, p. 318–335, maio 2015. ISSN 13640321. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032115000568>>.

BECKMAN, W. A.; KLEIN, S. A.; DUFFIE, J. A. **Solar heating design, by the F-chart method**. New York: Wiley-Interscience, 1977.

BIANCHINI, G. et al. An integrated model predictive control approach for optimal HVAC and energy storage operation in large-scale buildings. **Applied Energy**, v. 240, p. 327–340, 2019.

BIMAGANBETOVA, M.; MEMON, S. A.; SHERIYEV, A. Performance evaluation of phase change materials suitable for cities representing the whole tropical savanna climate region. **Renewable Energy**, v. 148, p. 402–416, abr. 2020. ISSN 09601481. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148119315332>>.

- BIYIK, E.; KAHRAMAN, A. A predictive control strategy for optimal management of peak load, thermal comfort, energy storage and renewables in multi-zone buildings. **Journal of Building Engineering**, v. 25, p. 100826, 2019.
- BLUMSACK, S.; FERNANDEZ, A. Ready or not, here comes the smart grid! **Energy**, v. 37, n. 1, p. 61–68, jan. 2012. ISSN 03605442. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544211005287>>.
- BOGO, A. et al. **Bioclimatologia Aplicada ao Projeto de Edificações Visando o Conforto Térmico**. Florianópolis, 1994. 80 p.
- BOLZANI, C. A. M. **Residências Inteligentes: Domótica, Redes Domésticas, Automação Residencial**. São Paulo: Livraria da Física, 2004.
- BRAGER, G.; DEAR, R. de. Climate, Comfort and Natural Ventilation: A New Adaptive Comfort Standard for ASHRAE Standard 55. In: **Proceedings: Moving Thermal Comfort Standards into the 21st Century**,. Oxford Brookes University, Windsor, United Kingdom: [s.n.], 2001. p. 1–18.
- BRASIL. **Lei 14.300 de 6 de Janeiro de 2022 - DOU**. 2022. Disponível em: <<https://in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.300-de-6-de-janeiro-de-2022-372467821>>.
- BYD-BRASIL. **B-BOX LV BYD PARA ARMAZENAMENTO DE ENERGIA SOLAR**. 2021. Disponível em: <http://www.byd.ind.br/2020/wp-content/uploads/2020/09/B-BOX_LV-FINAL.pdf>.
- CAMARGO, C. C. d. B.; TEIVE, R. C. G. **Gerenciamento pelo lado da demanda: Aspectos técnicos, econômicos, ambientais e políticas de conservação de energia**. Itajaí: Univali, 2006. ISBN 978-85-7861-191-0.
- CAMARGO, J. R. Resfriamento evaporativo: climatização ecológica. **Rio de Janeiro: Editora Moderna**, 2009.
- CARLUCCI, S. **Thermal Comfort Assessment of Buildings**. Springer Milan, 2013. (SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology). ISBN 978-88-470-5238-3. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=tYIEAAAQBAJ>>.
- CAROPRESO, R. d. T. et al. An Open-Source Framework for Smart Meters: Data Communication and Security Traffic Analysis. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 66, n. 2, p. 1638–1647, fev. 2019. ISSN 0278-0046, 1557-9948. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8301531/>>.
- CAUSONE, F. et al. Yearly operational performance of a nZEB in the Mediterranean climate. **Energy and Buildings**, v. 198, p. 243–260, set. 2019. ISSN 03787788. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778818337617>>.
- CAVALCA, D. L. **Algoritmo Híbrido de Otimização por Enxame de Partículas Aplicado ao Gerenciamento de Cargas Residenciais**. 2018. Tese (Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Ciência da Computação) — Departamento de Computação, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/9972?show=full>>.

CEN. **EN 15251: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics – Addressing Indoor air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics**. [S.l.], 2007. 56 p.

CEPEL; ELETROBRÁS. **CRESESB-Centro de Referência para Energia Solar e Eólica (Elétrorás - CEPEL)**. 2021. Cresesb2021. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>>.

CETIN, K. S.; MANUEL, L.; NOVOSELAC, A. Thermal comfort evaluation for mechanically conditioned buildings using response surfaces in an uncertainty analysis framework. **Science and Technology for the Built Environment**, v. 22, n. 2, p. 140–152, fev. 2016. ISSN 2374-4731, 2374-474X. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/23744731.2015.1100022>>.

CHOQUE, M. C. V. et al. Design, Implementation and Economic Analysis of a 2.16 kW Network Connected Photovoltaic System (SFCR) with Analyzed Microinversor in the Geographical and Climatological Conditions of the City of Juliaca. In: **2020 IEEE XXVII International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON)**. Lima, Peru: IEEE, 2020. p. 1–4. ISBN 978-1-72819-377-9. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9220238/>>.

CORBELLA, O.; CORNER, V. **Manual De Arquitetura Bioclimatica Tropical: PARA A REDUÇÃO DE CONSUMO ENERGETICO**. 2. ed. Rio de Janeiro: REVAN, 2011. ISBN 978-85-7106-408-9.

CULLATHER, K. **Energy Efficiency Policies, Programs, and Practices in the Midwest: A Resource Guide for Policymakers**. Paris, 2012. 75 p. Disponível em: <https://www.mcknight.org/wp-content/uploads/MEEA_2012_EE-Policy-Midwest-Resource-Guide.pdf>.

DEAR, R. de; BRAGER, G. Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference – Final Report on RP-884. **ASHRAE Transactions**, v. 104, p. 1–18, 1998.

DOE, U. **Benefits of demand response in electricity markets and recommendations for achieving them. A report to the United States Congress pursuant to section 1252 of the Energy Policy Act of 2005**. Washington, 2006. 97 p.

DU, K.-L.; SWAMY, M. **Search and optimization by metaheuristics: Techniques and Algorithms Inspired by Nature**. Birkhäuser: Springer International Publishing, 2016. Publisher: Springer.

ELETROBRÁS. **Pesquisa de Posse e Hábitos de Uso de Equipamentos Elétricos na Classe Residencial 2019: Resumo Executivo**. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <<https://eletrobras.com/pt/Paginas/PPH-2019.aspx>>.

_____. **PPH-2019**. 2021. Pphweb2021. Disponível em: <<https://eletrobras.com/pt/Paginas/PPH-2019.aspx>>.

ENESCU, D. A review of thermal comfort models and indicators for indoor environments. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 79, p. 1353–1379, nov. 2017. ISSN 13640321. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032117308109>>.

- FANGER, P. **Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering**. Danish Technical Press, 1970. ISBN 978-87-571-0341-0. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=S0FSAAAAMAAJ>>.
- FITZPATRICK, N.; TSANG, A. Veículos Elétricos como Impulsionadores para as Redes Elétricas Inteligentes. In: **Redes Elétricas Inteligentes: Aplicações, Comunicação e Segurança**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015. p. 37–56.
- FONSECA, A. L. A. d. et al. Escalonamento otimizado para consumo de eletricidade residencial inteligente e sustentável no cenário de tarifa horária branca com imposições mínimas de conforto térmico. In: **Anais do XII Congresso Brasileiro de Planejamento Energético**. Online: SBPE: Sociedade Brasileira de Planejamento Energético, 2020. p. 19. ISBN 978-65-992540-0-0.
- FOURER, R.; GAY, D. M.; KERNIGHAN, B. W. **AMPL: A Modeling Language for Mathematical Programming**. 2. ed. [S.l.]: Cengage Learning, 2003. ISBN 0-534-38809-4.
- FROTA, A. B. **Manual de conforto térmico**. São Paulo: Studio Nobel, 2006. ISBN 85-85445-39-4.
- GAGGE, A. P.; FOBELETS, A.; BERGLUND, L. A standard predictive index of human response to the thermal environment. **ASHRAE trans**, v. 92, n. 2, p. 709–731, 1986. Publisher: United States). Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/4384/08bc2c7f91c24ee881d7e6039f8ba2b69681.pdf>>.
- GELLINGS, C. **The Smart Grid: Enabling Energy Efficiency and Demand Response**. Fairmont Press, 2009. ISBN 978-0-88173-624-3. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=OzWDEILCyyYC>>.
- GELLINGS, C.; CHAMBERLIN, J. **Demand-side Management: Concepts and Methods**. Fairmont Press, 1988. ISBN 978-0-88173-027-2. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=LYPtAAAAMAAJ>>.
- GIVONI, B. **Man, Climate and Architecture**. London. New Jersey: Elsevier, 1969.
- _____. Comfort, climate analysis and building design guidelines. **Energy and Buildings**, v. 18, n. 1, p. 11–23, jan. 1992. ISSN 03787788. Number: 1. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/037877889290047K>>.
- GOOD, N.; MANCARELLA, P. Flexibility in Multi-Energy Communities With Electrical and Thermal Storage: A Stochastic, Robust Approach for Multi-Service Demand Response. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 10, n. 1, p. 503–513, jan. 2019. ISSN 1949-3053, 1949-3061. Number: 1. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8052516/>>.
- HAIDER, H. T.; SEE, O. H.; ELMENREICH, W. A review of residential demand response of smart grid. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 59, p. 166–178, jun. 2016. ISSN 13640321. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032116000447>>.
- HENSEN, J.; LAMBERTS, R. **Building Performance Simulation for Design and Operation**. CRC Press, 2012. ISBN 978-1-134-02635-7. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=Rckk5Z81Rv0C>>.

HEYWOOD, H. **101 Regras básicas para uma arquitetura de baixo consumo energético**. 1. ed. São Paulo: Gustavo Gili, 2015.

HSIANG, S. et al. The effect of large-scale anti-contagion policies on the COVID-19 pandemic. **Nature**, v. 584, n. 7820, p. 262–267, ago. 2020. ISSN 0028-0836, 1476-4687. Disponível em: <<http://www.nature.com/articles/s41586-020-2404-8>>.

HUANG, Y.; TIAN, H.; WANG, L. Demand response for home energy management system. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 73, p. 448–455, dez. 2015. ISSN 01420615. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142061515002379>>.

HUANG, Y. et al. Chance Constrained Optimization in a Home Energy Management System. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 9, n. 1, p. 252–260, jan. 2018. ISSN 1949-3053, 1949-3061. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7446361/>>.

IBGE. Site público, **Cidades@**. 2021. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/>>.

IEA, I. **Energy Policies of IEA Countries: Switzerland 2012 - Review**. Paris, 2012. 138 p.

_____. **Energy Policies of IEA Countries: United Kingdom 2012 - Review**. Paris, 2012. 201 p.

_____. **Energy Policies of IEA Countries: Germany 2013 - Review**. Paris, 2013. 209 p.

_____. **Energy Policies of IEA Countries: Netherlands 2014 - Review**. Paris, 2014. 201 p.

_____. **Energy Policies of IEA Countries: The United States 2014 - Review**. Paris, 2015. 281 p.

_____. **Energy Policies of IEA Countries: Canada 2015 - Review**. Paris, 2016. 285 p.

_____. **Energy Policies of IEA Countries: Italy 2016 - Review**. Paris, 2016. 285 p.

_____. **Energy Policies of IEA Countries: Denmark 2017 - Review**. Paris, 2017. 211 p.

INMET. **INMET :: BDMEP**. 2021. Disponível em: <<https://bdmep.inmet.gov.br/>>.

ISO. **7730: Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria**. [S.l.], 2005. 52 p. Volume: 3.

JAIN, A. et al. Data-Driven Model Predictive Control with Regression Trees – An Application to Building Energy Management. **ACM Trans. Cyber-Phys. Syst.**, v. 2, n. 1, 2018.

- JIN, C. et al. A fast building demand response method based on supply–demand coordination for urgent responses to smart grids. **Science and Technology for the Built Environment**, v. 25, n. 10, p. 1494–1504, nov. 2019. ISSN 2374-4731, 2374-474X. Number: 10. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/23744731.2019.1653626>>.
- JIN, X. et al. Foresee: A user-centric home energy management system for energy efficiency and demand response. **Applied Energy**, v. 205, p. 1583–1595, nov. 2017. ISSN 03062619. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261917311856>>.
- KORKAS, C. D. et al. Occupancy-based demand response and thermal comfort optimization in microgrids with renewable energy sources and energy storage. **Applied Energy**, v. 163, p. 93–104, 2016.
- KRISHNAMURTI, T. et al. Preparing for smart grid technologies: A behavioral decision research approach to understanding consumer expectations about smart meters. **Energy Policy**, v. 41, p. 790–797, fev. 2012. ISSN 03014215. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421511009244>>.
- LABEEE. Arquivos climáticos em formato TRY, SWERA, CSV e BIN, LABEEE (Laboratório de Eficiência Energética em Edificações). 2022. Disponível em: <<https://labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/formato-try-swera-csv-bin>>.
- _____. Arquivos climáticos INMET 2018, LABEEE (Laboratório de Eficiência Energética em Edificações). 2022. Disponível em: <<https://labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet2018>>.
- LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. **Eficiência energética na arquitetura. 3ª edição.** São Paulo: Eletrobrás, 2013.
- LEITE, C.; AWAD, J. di C. M. **Cidades sustentáveis, cidades inteligentes: desenvolvimento sustentável num planeta urbano.** Porto Alegre: Bookman, 2012. ISBN 978-85-7780-965-3. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=k7VJLgEACAAJ>>.
- LI, X.; WEN, J.; MALKAWI, A. An operation optimization and decision framework for a building cluster with distributed energy systems. **Applied Energy**, v. 178, p. 98–109, 2016.
- LIDDAMENT, M. W. A Guide to Energy Efficient Ventilation. **AIVC, Coventry, UK**, 1996.
- LIMA, D. A.; PEREZ, R. C.; CLEMENTE, G. A comprehensive analysis of the Demand Response Program proposed in Brazil based on the Tariff Flags mechanism. **Electric Power Systems Research**, v. 144, p. 1–12, mar. 2017. ISSN 03787796. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378779616304588>>.
- LIU, R.-S. An Algorithmic Game Approach for Demand Side Management in Smart Grid with Distributed Renewable Power Generation and Storage. **Energies**, v. 9, n. 8, p. 654, ago. 2016. ISSN 1996-1073. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1996-1073/9/8/654>>.

- LU, Y.; WANG, S.; SHAN, K. Design optimization and optimal control of grid-connected and standalone nearly/net zero energy buildings. **Applied Energy**, v. 155, p. 463–477, out. 2015. ISSN 03062619. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261915007655>>.
- LUIZ, A. M. **Energia solar e preservação do meio ambiente**. São Paulo: Editora Livraria de Física, 2013. ISBN 978-85-7861-191-0.
- LUO, F.; RANZI, G.; DONG, Z. Rolling horizon optimization for real-time operation of thermostatically controlled load aggregator. **Journal of Modern Power Systems and Clean Energy**, v. 5, n. 6, p. 947–958, 2017.
- LUO, F. et al. A Multistage Home Energy Management System With Residential Photovoltaic Penetration. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 15, n. 1, p. 116–126, jan. 2019. ISSN 1551-3203, 1941-0050. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8469052/>>.
- MAHONEY, C.; KOENIGSBERGER, O.; EVANS, M. Climate and house design. **Department of economic and social affairs. New York. United Nations**, v. 93, 1971.
- MANZANO-AGUGLIARO, F. et al. Review of bioclimatic architecture strategies for achieving thermal comfort. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 49, p. 736–755, set. 2015. ISSN 13640321. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032115003652>>.
- MARIOTTI, N. et al. Recent advances in eco-friendly and cost-effective materials towards sustainable dye-sensitized solar cells. **Green Chemistry**, v. 22, n. 21, p. 7168–7218, 2020. ISSN 1463-9262, 1463-9270. Number: 21. Disponível em: <<http://xlink.rsc.org/?DOI=D0GC01148G>>.
- MCKENNA, E. et al. Simulating residential demand response: Improving socio-technical assumptions in activity-based models of energy demand. **Energy Efficiency**, v. 11, n. 7, p. 1583–1597, out. 2018. ISSN 1570-646X, 1570-6478. Number: 7. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s12053-017-9525-4>>.
- MEINRENKEN, C. J.; MEHMANI, A. Concurrent optimization of thermal and electric storage in commercial buildings to reduce operating cost and demand peaks under time-of-use tariffs. **Applied Energy**, v. 254, p. 113630, nov. 2019. ISSN 03062619. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261919313170>>.
- MIYAZATO, T. **Aquecimento solar residencial: diretrizes para implantação**. [S.l.]: Appris Editora e Livraria Eireli-ME, 2016. ISBN 978-85-473-0259-7.
- MOHSENIAN-RAD, H.; LEON-GARCIA, A. Gerenciamento Autônomo pelo Lado da Demanda. In: **Redes Elétricas Inteligentes: Aplicações, Comunicação e Segurança**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015. p. 57–71.
- MOREIRA, B. Cidades inteligentes: O futuro do smart grid no Brasil. **O Setor Elétrico**, v. 9, n. 105, p. 68–75, 2014. Disponível em: <<https://www.osetoreletrico.com.br/cidades-inteligentes-o-futuro-do-smart-grid-no-brasil/>>.

- NAKANO, A.; PACHECO, C. R. d. F.; GRIMONI, J. A. B. Princípios dos Geradores Fotovoltaiacos Conectados à Rede Elétrica (GFVCR). In: MOREIRA, J. R. S. (Ed.). **Energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021. p. 277–302. ISBN 978-85-7861-191-0.
- NALINI, J. R.; NETO, W. L. B. d. S. Cidades inteligentes e sustentáveis: desafios conceituais e regulatórios. In: CORTESE, T. T. P.; KNISS, C. T.; MACCARI, E. A. (Ed.). **Cidades Inteligentes e Sustentáveis**. Barueri: Manole, 2017. p. 3–18.
- NGUYEN, H. T.; NGUYEN, D. T.; LE, L. B. Energy Management for Households With Solar Assisted Thermal Load Considering Renewable Energy and Price Uncertainty. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 6, n. 1, p. 301–314, jan. 2015. ISSN 1949-3053, 1949-3061. Number: 1. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6892986/>>.
- NICOL, J.; HUMPHREYS, M. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. **Energy and Buildings**, v. 34, n. 6, p. 563–572, jul. 2002. ISSN 03787788. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778802000063>>.
- NISKIER, J.; MACINTYRE, A. J. **Instalações Elétricas**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. ISBN 85-216-2342-9.
- NOLAN, S.; O'MALLEY, M. Challenges and barriers to demand response deployment and evaluation. **Applied Energy**, v. 152, p. 1–10, ago. 2015. ISSN 03062619. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261915005462>>.
- NREL. **EnergyPlus**. Colorado (US): National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2017. Disponível em: <<https://energyplus.net/downloads>>.
- OLGYAY, V. **Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism**. 4. ed. New Jersey: Princeton University Press, 1963.
- ONO, E. T. **Analysis Bio V. 2.2**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 2010.
- PAJOT, C. et al. Impact of Heat Pump Flexibility in a French Residential Eco-District. **Buildings**, v. 8, n. 10, p. 145, out. 2018. ISSN 2075-5309. Number: 10. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2075-5309/8/10/145>>.
- PALENSKY, P.; DIETRICH, D. Demand Side Management: Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 7, n. 3, p. 381–388, ago. 2011. ISSN 1551-3203, 1941-0050. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5930335/>>.
- PANHAN, A.; MENDES, L. D. S.; DAVIS, G. **Construindo Cidades Inteligentes**. Curitiba: Appris, 2016. ISBN 978-85-8192-929-3. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=vqQnvgAACAAJ>>.
- PATERAKIS, N. G.; ERDINÇ, O.; CATALÃO, J. P. An overview of Demand Response: Key-elements and international experience. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 69, p. 871–891, mar. 2017. ISSN 13640321. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032116308966>>.

- PIETTE, M. A. et al. Design and Operation of an Open, Interoperable Automated Demand Response Infrastructure for Commercial Buildings. **Journal of Computing and Information Science in Engineering**, v. 9, n. 2, p. 021004, jun. 2009. ISSN 1530-9827, 1944-7078. Disponível em: <<https://asmedigitalcollection.asme.org/computingengineering/article/doi/10.1115/1.3130788/465839/Design-and-Operation-of-an-Open-Interoperable>>.
- POMBEIRO, H.; MACHADO, M. J.; SILVA, C. Dynamic programming and genetic algorithms to control an HVAC system: Maximizing thermal comfort and minimizing cost with PV production and storage. **Sustainable Cities and Society**, v. 34, p. 228–238, 2017.
- PRADO, R. T.; GONÇALVES, O. M. Water heating through electric shower and energy demand. **Energy and Buildings**, v. 29, n. 1, p. 77–82, dez. 1998. ISSN 03787788. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778898000346>>.
- PROCEL. Público, **Equipamentos**. 2021. Dicasprocel2021. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7BE6BC2A5F-E787-48AF-B485-439862B17000%7D>>.
- _____. **Selo Procel**. 2021. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7BB70B5A3C-19EF-499D-B7BC-D6FF3BABE5FA%7D>>.
- R Core Team. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2019. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>.
- REISS, P. C.; WHITE, M. W. Household Electricity Demand, Revisited. **Review of Economic Studies**, v. 72, n. 3, p. 853–883, jul. 2005. ISSN 0034-6527, 1467-937X. Number: 3. Disponível em: <<https://academic.oup.com/restud/article-lookup/doi/10.1111/0034-6527.00354>>.
- Reiss Peter C.; White Matthew W. **Household Electricity Demand, Revisited**. 2002. Disponível em: <<https://web.stanford.edu/~preiss/demand.pdf>>.
- RODRÍGUEZ, L. R. et al. Heuristic optimization of clusters of heat pumps: A simulation and case study of residential frequency reserve. **Applied Energy**, v. 233-234, p. 943–958, 2019.
- _____. Contributions of heat pumps to demand response: A case study of a plus-energy dwelling. **Applied Energy**, v. 214, p. 191–204, mar. 2018. ISSN 03062619. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261918301004>>.
- ROMÉRO, M. d. A.; REIS, L. B. d. **Eficiência Energética em edifícios**. Barueri: Manole, 2012.
- RORIZ, M.; GHISI, E.; LAMBERTS, R. Bioclimatic zoning of Brazil: a proposal based on the Givoni and Mahoney methods. In: **Congress Annals of The 16th International Conference on Passive and Low Energy Architecture**. Brisbane - Austrália: [s.n.], 1999. p. 211–216.

_____. Uma proposta de norma técnica brasileira sobre desempenho térmico de habitações populares. In: **Anais do V Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído**. Fortaleza-CE: [s.n.], 1999.

RORIZ, M.; RORIZ, V. **Psicrom 1.1 - Relações Psicrométricas**. São Carlos-SP: Roriz Engenharia, 2016. Disponível em: <<https://roriz.eng.br/downloads>>.

RTE, R. **FRENCH CAPACITY MARKET: Report accompanying the draft rules**. Paris, 2014. 236 p.

RUPPERT, M. et al. Impact of residential electricity tariffs with variable energy prices on low voltage grids with photovoltaic generation. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 79, p. 161–171, jul. 2016. ISSN 01420615. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142061516000181>>.

SAFDARIAN, A. et al. Domestic EWH and HVAC management in smart grids: Potential benefits and realization. **Electric Power Systems Research**, v. 134, p. 38–46, maio 2016. ISSN 03787796. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378779615003983>>.

SANDULEAC, M. et al. Combining voltage level monitoring and voltage control in smart grids with high penetration of renewables in Terni, Italy. In: **Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower 2016)**. Belgrade, Serbia: Institution of Engineering and Technology, 2016. p. 76 (6 .)–76 (6 .). ISBN 978-1-78561-406-4. Disponível em: <<https://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp.2016.1065>>.

SANTOS, P. E. S. **Tarifas de Energia Elétrica—Estrutura Tarifária**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2011. v. 146. ISBN 978-85-7193-246-3.

SCHWEIKER, M. comf: An R Package for Thermal Comfort Studies. **The R Journal**, v. 8, n. 2, p. 341–351, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.32614/RJ-2016-050>>.

SEDC, S. **Mapping Demand Response in Europe Today: 2015**. Bruxelas, 2015. 187 p. Disponível em: <<http://www.smartem.eu/wp-content/uploads/2015/09/Mapping-Demand-Response-in-Europe-Today-2015.pdf>>.

_____. **Mapping Demand Response in Europe Today: 2017**. Bruxelas, 2017. 211 p. Disponível em: <<https://www.etip-snet.eu/sedc-report-2017-mapping-demand-response-europe-today/>>.

SHAIKH, P. H. et al. A review on optimized control systems for building energy and comfort management of smart sustainable buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 34, p. 409–429, jun. 2014. ISSN 13640321. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032114001889>>.

SHIDHANI, T. A.; IOANNOU, A.; FALCONE, G. Multi-Objective Optimisation for Power System Planning Integrating Sustainability Indicators. **Energies**, v. 13, n. 9, p. 2199, maio 2020. ISSN 1996-1073. Number: 9. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/13/9/2199>>.

- SIANO, P. Demand response and smart grids—A survey. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 30, p. 461 – 478, 2014. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113007211>>.
- SOWMY, D. S.; ARA, P. J. S. Energia Solar Térmica - Tecnologia e Aplicações. In: MOREIRA, J. R. S. (Ed.). **Energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021. p. 260–276. ISBN 978-85-7861-191-0.
- STAVRAKAS, V.; FLAMOS, A. A modular high-resolution demand-side management model to quantify benefits of demand-flexibility in the residential sector. **Energy Conversion and Management**, v. 205, p. 112339, fev. 2020. ISSN 01968904. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890419313469>>.
- TAHA, H. A. **Pesquisa Operacional. 8ª Edição**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008. Publisher: São Paulo: Pearson Prentice Hall.
- TANAKA, K. et al. Optimal operation of DC smart house system by controllable loads based on smart grid topology. **Renewable Energy**, v. 39, n. 1, p. 132–139, mar. 2012. ISSN 09601481. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148111004095>>.
- THORSNES, P.; WILLIAMS, J.; LAWSON, R. Consumer responses to time varying prices for electricity. **Energy Policy**, v. 49, p. 552–561, out. 2012. ISSN 03014215. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421512005721>>.
- VARDAKAS, J. S.; ZORBA, N.; VERIKOUKIS, C. V. A Survey on Demand Response Programs in Smart Grids: Pricing Methods and Optimization Algorithms. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 17, n. 1, p. 152–178, 2015. ISSN 1553-877X, 2373-745X. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6861959/>>.
- VASUDEVAN, J.; SWARUP, K. S. Price based Demand Response strategy considering load priorities. In: **2016 IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS)**. New Delhi, India: IEEE, 2016. p. 1–6. ISBN 978-1-5090-0128-6. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7584019/>>.
- VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações-Sistemas Isolados e Conectados à Rede. 1a. edição**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2012.
- VIVIAN, J. et al. A sensitivity analysis on the heating and cooling energy flexibility of residential buildings. **Sustainable Cities and Society**, v. 52, p. 101815, 2020.
- WANG, S. et al. Coordinated residential energy resource scheduling with human thermal comfort modelling and renewable uncertainties. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 13, n. 10, p. 1768–1776, maio 2019. ISSN 1751-8695, 1751-8695. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/iet-gtd.2018.5355>>.
- WATSON, D. Climatic design: Energy-Efficient Building Principles and Practices. n. McGraw-Hill, p. 280, 1983. ISSN 0070684782. Publisher: Inc.
- WMO. **World Weather Information Service**. 2021. Disponível em: <<https://worldweather.wmo.int/en/country.html?countryCode=136>>.

WONG, S. **Canadian Residential Demand Response and Ancillary Service Market Opportunities**. Varennes, 2015. 57 p.

YAN, X. et al. A review on price-driven residential demand response. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 96, p. 411–419, nov. 2018. ISSN 13640321. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032118305689>>.

YANG, D.; ZHANG, X.; ZHOU, B. Modeling and Control of Air Conditioning Loads for Consuming Distributed Energy Sources. **Energies**, v. 10, n. 10, p. 1630, out. 2017. ISSN 1996-1073. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1996-1073/10/10/1630>>.

YANG, L.; YAN, H.; LAM, J. C. Thermal comfort and building energy consumption implications – A review. **Applied Energy**, v. 115, p. 164–173, 2014. ISSN 03062619. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261913008921>>.

YAO, R.; LI, B.; LIU, J. A theoretical adaptive model of thermal comfort – Adaptive Predicted Mean Vote (aPMV). **Building and Environment**, v. 44, n. 10, p. 2089–2096, 2009.

ZHANG, F.; DEAR, R. de. Application of Taguchi method in optimising thermal comfort and cognitive performance during direct load control events. **Building and Environment**, v. 111, p. 160–168, jan. 2017. ISSN 03601323. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S036013231630436X>>.

ZHANG, F.; DEAR, R. de; CANDIDO, C. Thermal comfort during temperature cycles induced by direct load control strategies of peak electricity demand management. **Building and Environment**, v. 103, p. 9–20, jul. 2016. ISSN 03601323. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132316301032>>.

ZHOU, B. et al. Smart home energy management systems: Concept, configurations, and scheduling strategies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 61, p. 30–40, ago. 2016. ISSN 13640321. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032116002823>>.

ZHOU, S. et al. Real-time Energy Control Approach for Smart Home Energy Management System. **Electric Power Components and Systems**, v. 42, n. 3-4, p. 315–326, mar. 2014. ISSN 1532-5008, 1532-5016. Number: 3-4. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15325008.2013.862322>>.