

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Maria Luani Pereira dos Santos

**ABORDAGEM DETERMINÍSTICA BASEADA EM RESPOSTA À
DEMANDA PARA O PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO DE
RECURSOS ENERGÉTICOS DISTRIBUÍDOS EM RESIDÊNCIAS**

Santa Maria, RS, Brasil
2023

Maria Luani Pereira dos Santos

**ABORDAGEM DETERMINÍSTICA BASEADA EM RESPOSTA À DEMANDA
PARA O PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO DE RECURSOS ENERGÉTICOS
DISTRIBUÍDOS EM RESIDÊNCIAS**

Projeto de dissertação apresentado ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Área de Concentração Gerência da Produção, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia de Produção.**

Orientador: Prof. Dr. Vinícius Jacques Garcia

Santa Maria, RS, Brasil
2023

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

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

Santos, Maria Luani Pereira dos
ABORDAGEM DETERMINÍSTICA BASEADA EM RESPOSTA À DEMANDA
PARA O PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO DE RECURSOS ENERGÉTICOS
DISTRIBUÍDOS EM RESIDÊNCIAS / Maria Luani Pereira dos
Santos.- 2023.
107 p.; 30 cm

Orientador: Vinicius Jacques Garcia
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Produção, RS, 2023

1. Gerenciamento Energia Residencial 2. Gerenciamento
de Recursos Energéticos Residenciais 3. Resposta à
Demanda 4. Rede Inteligente 5. Programação Linear
Inteira Mista I. Garcia, Vinicius Jacques II. Título.

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

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

Maria Luani Pereira dos Santos

**ABORDAGEM DETERMINÍSTICA BASEADA EM RESPOSTA À DEMANDA
PARA O PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO DE RECURSOS ENERGÉTICOS
DISTRIBUÍDOS EM RESIDÊNCIAS**

Projeto de dissertação apresentado ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Área de Concentração Gerência da Produção, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia de Produção**.

Aprovada em 01 de março de 2023:

Orientador: Prof. Dr. Vinícius Jacques Garcia (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Prof. Dr. Moises Machado Santos (UNIJUI)

Prof. Dr. Daniel Pinheiro Bernardon (UFSM)

Prof. Dr. Carlos Henrique Barriquello (UFSM)

Santa Maria, RS, Brasil
2023

DEDICATÓRIA

Dedico essa Dissertação aos meus amados pais Maria Lindalva Pereira dos Santos e Aldemiro Sousa dos Santos (*in memoriam*), a todos os meus irmãos, Maria Olinda, Linda Maria, Delmiro, Odecivaldo, Edvaldo, Dezivaldo, Manoel Deziel, Deividy, Mariane e Anderson.

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo agradeço a Deus, por me proporcionar muitas bênçãos durante todos os dias da minha vida. Me concebendo sempre sabedoria, capacitação, motivação e força de vontade para que eu possa concretizar meus sonhos. Pois sem ele, eu nada seria.

Aos meus amados pais, Aldemiro Sousa dos Santos (*in memoriam*) e Maria Lindalva Pereira dos Santos, que sempre estiveram ao meu lado, me dando força, carinho e muito amor, por sempre acreditarem em meus sonhos e nunca terem medido esforços para tornar esses sonhos realidade. Eu os amo muito e sou infinitamente grata, pois sem eles eu não estaria aqui hoje.

Aos meus irmãos, Maria Olinda, Linda Maria, Delmiro, Odecivaldo, Edvaldo, Dezivaldo, Manoel Deziel, Deividy, Mariane e Anderson, pelo companheirismo e força, por estarem ao meu lado, se preocuparem comigo e estarem cuidando da mamãe quando estou longe e não posso ajudar de maneira mais ativa nos cuidados com ela nos momentos em ficou doente.

A todos os meus familiares e amigos, por sonharem junto comigo e me ajudarem a não desistir, especial meus sobrinhos e sobrinhas, meus cunhados e cunhadas por tantos momentos felizes que já me proporcionaram e ainda proporcionam as minhas tias Carmita e Cristina por estarem sempre apoiando, cuidando e ajudando minha mãe e eu.

Agradeço meus queridos amigos Michelle Alcântara, Josiellen Barreto, Junior Ribeiro, Demison Farias e Leonardo Alves por sempre me dizerem que acreditam em mim, estarem ao meu lado me apoiando e por compartilhar muitos momentos felizes comigo.

Ao meu companheiro de jornada e também mestrando Diego Marques que está comigo durante todo esse período do mestrado e foi a pessoa que me ajudou de maneira mais próxima a prosseguir em minha carreira acadêmica, bem como a minha companheira de projeto Stéfane Rodrigues por sua ajuda oferecida durante o período de mestrado.

Ao meu querido professor e orientador Vinicius Jacques Garcia, por todos os ensinamentos que agregam valor à minha vida acadêmica, profissional e pessoal, pelo companheirismo e por toda a confiança depositada. Agradeço à toda a equipe do PPGEF por todo o esforço e dedicação as meninas da secretaria por estarem sempre dispostas a me ajudar para que eu possa me tornar uma profissional qualificada.

E por fim, agradecer a agência governamental CAPES, pois o presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de financiamento 001.

“I am enough of an artist to draw freely upon my imagination.
Imagination is more important than knowledge. Knowledge is limited.
Imagination encircles the world.”

— Albert Einstein

RESUMO

ABORDAGEM DETERMINÍSTICA PARA PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO DE RECURSOS ENERGÉTICOS DISTRIBUÍDOS EM RESIDÊNCIAS

AUTORA: Maria Luani Pereira dos Santos
ORIENTADOR: Vinícius Jacques Garcia

As residências estão incorporando cada vez mais as tecnologias que relacionam recursos energéticos distribuídos (RED), requerendo, portanto, o gerenciamento adequado e eficiente da operação quanto ao custo de energia e também quanto à sustentabilidade. Os REDs se traduzem em autonomia de gerenciamento de consumo energético, diante de sinais econômicos tarifários. No entanto, para que essa autonomia se traduza em benefícios aos consumidores, um dos aspectos fundamentais é o desenvolvimento de sistemas de gerenciamento de energia residencial (HEMS) eficientes, em conjunto com um programa resposta à demanda (RD). A implementação de RD através do HEMS no setor residencial tem um grande significado, pois o emprego conjunto de um programa de controle de demanda e do HEMS torna possível desenvolver uma programação para o momento e para o tempo de consumo dos eletrodomésticos e dos recursos energéticos da residência, além de propiciar ao consumidor a função prosumidor. Esta dissertação tem como diferencial o desenvolvimento de um mapeamento sistemático da literatura sobre os trabalhos que investigam as abordagens utilizadas para determinar o planejamento de operações dos RED em residências, o que permitiu abordar o HEMS sobre a perspectiva do prosumidor: o gerenciamento dos RED e das cargas controláveis e não controláveis que a residência possui, com uma abordagem baseada em Programação Linear Inteira Mista para o problema de decisão associado ao HEMS que considera a geração, o armazenamento, o consumo de energia elétrica, veículos elétricos V2G (*vehicle-to-grid*), além de mecanismos de controle de demanda para verificar a melhor forma de realizar a programação dos eletrodomésticos/cargas. Os resultados alcançados com os estudos de casos propostos demonstram uma eficiência da abordagem na redução dos custos, ao tempo em que também aumenta a autonomia energética diante de eventual indisponibilidade do fornecimento de energia elétrica, parte da distribuidora.

Palavras-chave: Gerenciamento Energia Residencial. Gerenciamento de Recursos Energéticos Residenciais. Resposta à Demanda. Rede Inteligente. Programação Linear Inteira Mista.

ABSTRACT

DETERMINISTIC APPROACH FOR OPERATION PLANNING OF DISTRIBUTED ENERGY RESOURCES IN HOUSEHOLDS

AUTHOR: Maria Luani Pereira dos Santos

ADVISOR: Vinicius Jacques Garcia

Households are increasingly incorporating technologies that relate distributed energy resources (DER), thus requiring the proper and efficient management of the operation regarding energy cost and also regarding sustainability. The DERs translate into energy consumption management autonomy, in the face of economic tariff signals. However, for this autonomy to translate into consumer benefits, one of the key aspects is the development of efficient home energy management systems (HEMS) in conjunction with a demand response (DR) program. The implementation of DR through HEMS in the residential sector has a great significance, because the joint use of a demand control program and HEMS makes it possible to develop a schedule for the time and consumption of household appliances and energy resources, and provide the consumer the prosumer function. This dissertation has as differential the development of a systematic mapping of the literature on the works that investigate the approaches used to determine the planning of operations of DER in residences, which allowed to approach the HEMS on the prospect of the prosumer: the management of DER and controllable and uncontrollable loads that the residence has, with a Mixed Integer Linear Programming-based approach to the decision problem associated with HEMS that considers generation, storage, electricity consumption, electric vehicles V2G (vehicle-to-grid), and demand control mechanisms to verify the best way to perform the scheduling of the appliances/loads. The results achieved with the proposed case studies demonstrate an efficiency of the approach in reducing costs, while also increasing energy autonomy in the face of eventual unavailability of electricity supply, part of the distributor.

Keywords: Home Energy Management. Home Energy Resource Management. Demand Response. Smart Grid. Mixed Integer Linear Programming.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Recursos Energéticos Distribuídos.	12
Figura 2 – <i>Framework</i> da estrutura das etapas do processo de pesquisa.	30
Figura 3 – Processo de filtragem.	33
Figura 4 – Mapa conceitual das abordagens utilizadas nos estudos.	44
Figura 5 – Mapa Conceitual das principais técnicas de integração utilizadas nos estudos.	46
Figura 6 – Mapa conceitual do gerenciamento dos recursos energéticos em <i>smart homes</i>	48
Figura 7 – Mapa conceitual dos tratamentos das condições estocásticas.	50
Figura 8 – Mapa conceitual das ferramentas para análise de dados nos estudos.	53
Figura 9 – Mapa conceitual das formas de discretizações adotadas nos estudos.	55
Figura 10 – Publicações por base de dados, data e tipo.	56
Figura 11 – Metodologia de pesquisa em Engenharia de Produção.	59
Figura 12 – Estrutura ilustrativa da HEMS.	61
Figura 13 – Modelo conceitual do circuito elétrico relacionado ao HEMS.	63
Figura 14 – Fluxograma com a descrição da dinâmica de aplicação do gerenciamento de energia doméstica proposta.	69
Figura 15 – Gráfico do perfil de geração FV para 24h00 discretizado para cada 15 minutos.	78
Figura 16 – Perfil de tarifa variável utilizada no estudo de caso.	79
Figura 17 – Perfil de tarifas compra/venda de energia em relação energia comprada/vendida pela SH para o Caso 1.	81
Figura 18 – Perfil de tarifas compra/venda de energia e geração FV em relação a carga/descarga do VE e da energia total dos aparelhos elétricos residenciais para o Caso 1.	82
Figura 19 – Gráfico do cronograma de funcionamento dos aparelhos elétricos controláveis resultante para o Caso 1.	83
Figura 20 – Gráfico do cronograma de funcionamento dos aparelhos elétricos não controláveis resultante para o Caso 1.	84
Figura 21 – Perfil de tarifas compra/venda de energia em relação energia comprada/vendida pela SH para o Caso 2.	85
Figura 22 – Perfil de tarifas compra/venda de energia e geração FV em relação a carga/descarga do VE e da energia total dos aparelhos elétricos residenciais para o Caso 2.	86

Figura 23 – Gráfico do cronograma de funcionamento dos aparelhos elétricos controláveis resultante para o Caso 2.....	87
Figura 24 – Gráfico do cronograma de funcionamento dos aparelhos elétricos não controláveis resultante para o Caso 2.	88
Figura 25 – Perfil de tarifas compra/venda de energia em relação energia comprada/vendida pela SH para o Caso 3.....	89
Figura 26 – Perfil de tarifas compra/venda de energia e geração FV em relação a carga/descarga do VE e da energia total dos aparelhos elétricos residenciais para o Caso 3.	90
Figura 27 – Gráfico do cronograma de funcionamento dos aparelhos elétricos controláveis resultante para o Caso 3.....	91
Figura 28 – Gráfico do cronograma de funcionamento dos aparelhos elétricos não controláveis resultante para o Caso 3.	92
Figura 29 – Perfil de tarifas compra/venda de energia em relação energia comprada/vendida pela SH para o Caso 4.....	93
Figura 30 – Perfil de tarifas compra/venda de energia e geração FV em relação a carga/descarga do BESS e da energia total dos aparelhos elétricos residenciais para o Caso 4.	94
Figura 31 – Perfil de tarifas compra/venda de energia e geração FV em relação a carga/descarga do VE e da energia total dos aparelhos elétricos residenciais para o Caso 4.	95
Figura 32 – Gráfico do cronograma de funcionamento dos aparelhos elétricos controláveis resultante para o Caso 4.....	96
Figura 33 – Gráfico do cronograma de funcionamento dos aparelhos elétricos não controláveis resultante para o Caso 4.	97
Figura 34 – Perfil de tarifas compra/venda de energia em relação energia comprada/vendida pela SH para o Caso 5.....	98
Figura 35 – Perfil de tarifas compra/venda de energia e geração FV em relação a carga/descarga do BESS e da energia total dos aparelhos elétricos residenciais para o Caso 5.	99
Figura 36 – Perfil de tarifas compra/venda de energia e geração FV em relação a carga/descarga do VE e da energia total dos aparelhos elétricos residenciais para o Caso 5.	100

Figura 37 – Gráfico do cronograma de funcionamento dos aparelhos elétricos controláveis resultantes para o Caso 5.	101
Figura 38 – Gráfico do cronograma de funcionamento dos aparelhos elétricos não controláveis resultantes para o Caso 5.....	102
Figura 39 – Perfil de tarifas compra/venda de energia em relação energia comprada/vendida pela SH para o Caso 6.....	103
Figura 40 – Perfil de tarifas compra/venda de energia e geração FV em relação a carga/descarga do BESS e da energia total dos aparelhos elétricos residenciais para o Caso 6.	105
Figura 41 – Perfil de tarifas compra/venda de energia e geração FV em relação a carga/descarga do VE e da energia total dos aparelhos elétricos residenciais para o Caso 6.	106
Figura 42 – Gráfico do cronograma de funcionamento dos aparelhos elétricos não controláveis resultantes para o Caso 6.....	107
Figura 43 – Gráfico do cronograma de funcionamento dos aparelhos elétricos não controláveis resultantes para o Caso 6.....	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Apresentação das questões definidas para a pesquisa.	28
Tabela 2 – Bases de dados e String de pesquisa.	30
Tabela 3 – Relação dos artigos mapeados.	33
Tabela 4 – Descrição dos elementos presentes no modelo matemático proposto.	65
Tabela 5 – Dados de entrada dos eletrodomésticos controláveis e não controláveis utilizados na aplicação dos casos.	77
Tabela 6 – Parâmetros técnicos de entrada para a operação do HEMS.	78
Tabela 7 – Resultados dos custos de compra e venda de energia, custo de não atendimento das cargas e custo total para os 6 Casos.	109
Tabela 8 – Comparação percentual entre os custos totais para 6 Casos.	109

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	Aparelhos Controláveis	V2G	Vehicle-to-Grid
ANC	Aparelhos Não-Controláveis	V2H	Vehicle-to-Home
CDE	Concessionárias de Distribuição de Energia	VE	Veículo Elétrico
EMS	Estudo de Mapeamento Sistemático	VOV	Volt/Var
FV	Fotovoltaica	WT	Wind Turbine
G2H	Grid-to-Home		
GD	Geração distribuída		
HEMS	Home Energy Management System		
HPEMC	Heuristic-based Programmable Energy Management Controller		
HPMF	Home Power Management Framework		
HVAC	Heating, Ventilating, and Air-Conditioning		
LoL	Loss-of-Life		
NU	Nações Unidas		
PAR	Peak-to-Average Ratio		
PEV	Plug-in-Electric Vehicle		
PHEV	Plug-in-Hybrid Electric Vehicles		
PIM	Programação Inteira Mista		
PLIM	Programação Linear Inteira Mista		
PRD	Programas de resposta à demanda		
RD	Resposta à Demanda		
RED	Recursos energéticos distribuídos		
RER	Recursos energéticos renováveis		
RI	Redes Inteligentes		
SAE	Sistema de armazenamento de energia		
BESS	Sistema de armazenamento de energia por bateria (<i>Battery Energy Storage System</i>)		
SH	Smart Homes		
TCD	Tarifa de Cobrança de Demanda		
UAB	Unidades de Armazenamento de Bateria		
UAE	Unidades de armazenamento de energia		

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
1.1.	JUSTIFICATIVA	14
1.2.	PROBLEMÁTICA	15
1.3.	ESCOPO E DELIMITAÇÕES	16
1.4.	OBJETIVOS	17
1.4.1.	Objetivo Geral	17
1.4.2.	Objetivos Específicos	17
1.5.	ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1.	RECURSOS ENERGÉTICOS DISTRIBUÍDOS	19
2.2.	SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE ENERGIA RESIDENCIAL	24
2.2.1.	Soluções Comerciais	26
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
3.1.	ESTUDO DE MAPEAMENTO SISTEMÁTICO	28
3.1.1.	Definição das questões de pesquisa	28
3.1.2.	Processo de pesquisa	29
3.1.3.	Processo de filtragem	31
3.1.4.	Resultados e Análises	33
3.1.4.1.	Exposição dos artigos selecionados (respondendo as questões)	35
3.1.4.2.	Contribuições para o estudo	56
4.	METODOLOGIA	59
4.1.	CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	59
4.2.	PROPOSTA DO ESQUEMA PARA RESPOSTA A DEMANDA	60
4.3.	ARQUITETURA DO HEMS	61
4.4.	DEFINIÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO DO HEMS	64
5.	ESTUDO DE CASO	76
5.1.	DEFINIÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA	76
5.2.	Casos para validação	79

5.3.	RESULTADOS E ANÁLISES DOS CASOS	80
5.3.1.	Caso 1	80
5.3.2.	Caso 2.....	84
5.3.3.	Caso 3.....	88
5.3.4.	Caso 4.....	92
5.3.5.	Caso 5.....	97
5.3.6.	Caso 6.....	102
6.	CONCLUSÕES	111
6.1.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	111
	REFERÊNCIAS	113
	APÊNDICE A – TABELA COM OS RESULTADOS PARA O CASO 1.....	120
	APÊNDICE B – TABELA COM OS RESULTADOS PARA O CASO 2.....	123
	APÊNDICE C – TABELA COM OS RESULTADOS PARA O CASO 3.....	126
	APÊNDICE D – TABELA COM OS RESULTADOS PARA O CASO 4.....	129
	APÊNDICE E – TABELA COM OS RESULTADOS PARA O CASO 5.....	132
	APÊNDICE F – TABELA COM OS RESULTADOS PARA O CASO 6.....	135

1. INTRODUÇÃO

A movimentação de descarbonização da matriz energética do setor elétrico que se impõe, os avanços nas áreas de telecomunicação e a digitalização têm impulsionado e propiciado um ambiente favorável ao desenvolvimento de Recursos Energéticos Distribuídos – RED (*Distributed Energy Resources*), tais como geração distribuída, mobilidade elétrica, sistemas de armazenamento de energia e programas de resposta à demanda, como apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Recursos Energéticos Distribuídos.



Fonte – Adaptado de IRENA (2019).

Sob a ótica das distribuidoras de energia elétrica, tais recursos têm pressionado e acelerado o desenvolvimento das Redes Inteligentes – RI (*smart-grids*), com objetivo de proporcionar mais observabilidade e controlabilidade dos sistemas. Ressalta-se que os RED podem postergar investimentos, quando bem gerenciados. No entanto, se não forem adequadamente gerenciados, podem implicar em congestionamentos de rede e na necessidade de reforços, aumentando ainda mais, a necessidade de investimentos.

Do ponto de vista do consumidor, os REDs se traduzem em autonomia de gerenciamento de consumo energético, diante de sinais econômicos tarifários. No entanto, para que essa autonomia se traduza em benefícios aos consumidores, um dos aspectos fundamentais é o desenvolvimento de sistemas de gerenciamento de energia residencial – HEMS (*Home*

Energy Management System) eficientes, em conjunto com um programa resposta à de demanda – RD (*Demand Response*).

Ao analisar o comportamento dos REDs no setor elétrico nos últimos anos é possível verificar que houve uma aceleração na inserção dos mesmos, principalmente justificada pela redução nos custos de investimentos, pelo papel mais ativo dos consumidores nesse campo e pelas constantes transformações que o campo da energia elétrica vem sofrendo.

Essas transformações derivadas da inserção em massa dos REDs demandam novas práticas de planejamento da geração de energia e da operação e expansão das redes elétricas. Entretanto, apesar dos desafios impostos com a implantação dos REDs, é possível observar que pode haver diversos benefícios associados à sua integração ao sistema. Primeiramente, ao levar em consideração a proximidade entre geração e consumo, os RED podem proporcionar a redução de perdas elétricas (EPE, 2019a). Adicionalmente, de acordo com Zhao et al. (2022), os REDs podem fornecer flexibilidade e promover maneiras de controlar as redes de distribuição.

A redução de perdas elétricas que provém da proximidade entre geração e consumo é a contribuição mais notória dos REDs, além da energética. As outras contribuições precisam de condições específicas, como a localização ideal e operação em certos intervalos de horários com vistas à melhoria da confiabilidade em situações extremas (EPE, 2020).

Dentre as tecnologias englobadas pelos REDs, convém destacar que os geradores distribuídos estão sofrendo um aumento em sua implantação e, conforme Zhao et al. (2022), a crescente implantação da Geração Distribuída – GD (*Distributed Generation*) principalmente na forma de painéis fotovoltaicos gera instabilidades para as redes de distribuição em função da intermitência inerente e da limitada controlabilidade das energias renováveis. Dessa forma, movidos pelo conceito de redes inteligentes, os clientes são estimulados a integrarem programas de resposta à demanda.

Nesse contexto, esta Dissertação tem por objetivo explorar os HEMS sob a ótica do consumidor, por meio uma abordagem baseada em Programação Linear Inteira Mista – PLIM (*Mixed Integer Linear Programming*) a partir da concepção de gerenciamento da energia transacionada entre o consumo e a produção. Da parte do consumo, não somente os eletrodomésticos como também o próprio veículo elétrico deverá ter o consumo de energia devidamente programado de forma parcial (em determinados horários, certas cargas) ou total (qualquer horário, qualquer carga). No que se refere à produção de energia, a decisão deve considerar o momento de armazenar energia no BESS ou no veículo elétrico ou, ainda, exportar

energia para a rede elétrica, considerando o planejamento diário. Ressalta-se que a residência possuirá diferentes eletrodomésticos (controláveis e não controláveis), veículo elétrico *plug-in* (*Plug-in-Electric Vehicle*), painéis fotovoltaicos (*Photovoltaic – PV*) e sistema de armazenamento de energia por bateria – BESS (*Battery Energy Storage System*).

1.1. JUSTIFICATIVA

A população urbana mundial deve crescer em mais 2,2 bilhões de pessoas até 2050, conforme dados apresentados em um estudo realizado pela ONU em 2022 (XIANG; CAO, 2022). Vinculado a este aumento populacional se tem como exemplo a necessidade de aumento na geração de energia elétrica visando suprir a demanda crescente por carga no setor residencial. Esse aumento exponencial de demanda de energia elétrica resulta em uma lacuna no *trade-off* entre oferta-demanda no mercado, o que pode precarizar o serviço de fornecimento de energia. De outra parte, a alta demanda em horários específicos ocasiona um planejamento mais difícil do sistema de energia elétrica, sugerindo o uso de mecanismos indutivos, seja pela diferenciação tarifária ou mesmo por mecanismos de controle de demanda, normalmente ocasionam eventuais desconfortos aos usuários (HUANG *et al.*, 2018; TANTAWY; AMER; FAYEZ, 2022). A ausência absoluta destes mecanismos pode conduzir a um colapso no fornecimento, gerando os chamados *blackouts* (IRENA, 2022).

As tecnologias emergentes relacionadas às redes inteligentes representam boas alternativas para contornar estes problemas relacionados ao desequilíbrio entre oferta-demanda de energia elétrica, com os recursos energéticos distribuídos, tais como PV, RD, BESS e VEs. Com eles, os consumidores se tornam cada vez mais ativos dentro do sistema de gerenciamento de energia elétrica e passam não somente a consumir, mas também a gerar e armazenar energia. Dessa forma, podem proporcionar uma operação mais econômica e confiável na distribuição de energia, a fim de minimizar o custo de eletricidade e aumentar sua participação no sistema de gerenciamento por meio da participação mais ativa nos programas de RD (PAL; KUMAR, 2018; ZAMANLOO *et al.*, 2021).

Uma tecnologia chave para realizar tanto a gestão energética da residência quanto a participação do consumidor por meio da RD é o sistema de gerenciamento de energia residencial. O uso do HEMS possibilita a incorporação de RED na perspectiva de um problema de decisão que relaciona características econômicas e operacionais na operação da energia transacionada entre a casa e a rede (AMER *et al.*, 2021). Sendo assim, é possível verificar a

importância do HEMS na vida dos consumidores residenciais e a conveniência do tratamento adequado do problema de decisão associado ao balanço energético residencial. Nesse sentido, o desenvolvimento de modelos eficientes para gerenciamento de recursos energéticos distribuídos para residências está ganhando cada vez mais espaço no setor elétrico residencial, pois os prosumidores podem participar de maneira ativa da gestão energética de sua residência.

Mediante ao papel fundamental que os sistemas de gerenciamento de energia possuem na operação das instalações elétricas, tanto do lado da concessionária quanto do lado do prosumidor, esta dissertação aborda formas de utilização de ferramentas de gestão energética no HEMS que possibilitem tanto a inserção dos RED no setor residencial quanto para garantir adequada operação destes recursos. Para isto, se pretende elaborar uma abordagem determinística baseada em Programação Linear Inteira Mista a partir da concepção de gerenciamento da energia transacionada entre o consumo e a produção, visando garantir que a operação se mantenha equilibrada entre os objetivos definidos para a sua operação.

1.2. PROBLEMÁTICA

Diversas são as técnicas de otimização matemática usadas para determinar um cronograma ótimo de deslocamento de carga. Técnicas de otimização matemática baseadas em restrições estão sendo utilizadas de maneira destacada para escalonamento de dispositivos. Programação linear, não linear e convexa são exemplos de métodos de otimização baseadas em restrições. Modelos de programação linear e não linear computam as relações entre variáveis como uma função linear e não linear, respectivamente, conforme a distribuição dos dados de referência. Problemas onde é feita a otimização matemática são computacionalmente “difíceis” quando envolvem um grande número de restrições e variáveis. Em muitos problemas, é desejável encontrar uma solução que seja aceitável em vez de uma profundamente otimizada (ZAFAR; BAYHAN; SANFILIPPO, 2020).

Para verificar se é possível realizar a otimização do uso dos recursos energéticos residenciais por meio do uso de técnicas de otimização matemática baseadas em programação linear inteira, de maneira que possa se obter o menor custo do uso de eletricidade e sem prejudicar o conforto do usuário residencial, é proposto o uso um modelo matemático baseada em PLIM para o problema de decisão associado ao HEMS considerando os recursos energéticos residenciais em sua modelagem. Com isso, o este trabalho pode ser resumido ao seguinte problema de pesquisa: **“O planejamento dos recursos energéticos - armazenadores, veículo**

elétrico, geração fotovoltaica e cargas - de uma residência pode ser desenvolvido com base em um método baseado em programação linear inteira?”

1.3. ESCOPO E DELIMITAÇÕES

Esta dissertação apresentará uma abordagem determinística para o caso de gestão de recursos energéticos de uma residência inteligente sob a ótica do consumidor, diante de sinais econômicos tarifários horários, ressalta-se que os aspectos relativos à estocasticidade do problema não são considerados. É desenvolvido um HEMS que contém um programa de RD para realizar o gerenciamento da programação dos REDs da residência. Com relação à RD, seu conceito e suas abordagens podem ser utilizados de maneira ampla dentro do contexto de GD. Porém, neste estudo o programa de RD será utilizado como uma forma de controle de demanda, ou seja, vai possibilitar ao prosumidor realizar a programação das cargas residenciais visando obter a eficiência energética sem comprometer seu conforto, utilizando por exemplo a estratégia de mudança no uso das cargas de horário de pico de energético para fora de pico. As cargas serão divididas em cargas programáveis e não programáveis. O esquema de RD utilizado será de preços por tempo de uso (TOU), que é um dos métodos importantes para realizar o gerenciamento do lado da demanda (usuários).

Os usuários da residência assumem o papel de prosumidor, situação em que eles passam não somente a consumir eletricidade, mas também a produzir por meio do uso da geração distribuída. No HEMS desenvolvido, será utilizada a geração de energia fotovoltaica a fim de diminuir o consumo de energia proveniente da rede assim como para armazenamento no BESS. O sistema de armazenamento de energia será composto por um BESS e por um VE, o qual pode possibilitar a carga e descarga no momento mais conveniente: o VE funciona tanto como uma carga que consome eletricidade quanto como uma fonte de armazenamento de eletricidade através do V2G. O HEMS também conta com um inversor híbrido que é responsável pelo gerenciamento da energia do sistema fotovoltaico, BESS, VE e a rede elétrica principal, bem como, do processo de carregamento do sistema de armazenamento. Por fim, os dados utilizados na aplicação do problema apresentando no estudo serão baseados nas previsões de demanda e de geração fotovoltaica.

1.4. OBJETIVOS

A seguir serão apresentados os objetivos a serem alcançados com a realização desta dissertação, esses objetivos estão fragmentados em objetivo geral e objetivos específicos.

1.4.1. Objetivo Geral

Esta Dissertação tem por objetivo principal o desenvolvimento de uma estratégia de HEMS que contempla aspectos econômicos e o conforto do consumidor, a partir da operação integrada de GD-PV, Sistema de armazenamento de energia, veículo elétrico e sinais econômicos tarifários.

1.4.2. Objetivos Específicos

São estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver um modelo matemático de HEMS, baseada em MILP, que considera a geração, o armazenamento e o consumo de energia elétrica;
- Incorporar o veículo elétrico V2G na concepção de HEMS proposta;
- Desenvolver um mecanismo de controle de demanda associado ao HEMS proposto;
- Considerar diferentes patamares tarifários ao longo de um dia;
- Desenvolver uma abordagem para operação econômica do HEMS.

1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho é estruturado em 6 capítulos.

O capítulo subsequente traz o Fundamentação Teórica. Este capítulo exhibe as definições e características sobre os recursos energéticos distribuídos: geração distribuída, RD, PV, sistema de armazenamento de energia por bateria³, veículos elétricos; HEMS

O capítulo 3 contém a Revisão Bibliográfica, onde foi realizado um estudo de mapeamento sistemático visando verificar o tema abordado dentro do cenário mundial.

No capítulo 4 apresenta-se a Metodologia. Este tópico expõe a classificação da pesquisa quanto a sua natureza, a abordagem, os objetivos e o método de análise dos dados. Apresenta a estrutura da RD a arquitetura do HEMS, modelo matemático conceitual e a modelagem matemática do HEMS.

O capítulo 5 é responsável por apresentar o estudo de caso. Este capítulo apresenta a elaboração dos 5 casos propostos, seus respectivos dados de entrada e a realização da análise dos resultados obtidos com a aplicação do modelo proposto.

O capítulo 6 apresenta a conclusão da dissertação. Neste capítulo são realizadas as conclusões sobre o conteúdo gerado pela aplicação do modelo, suas respectivas limitações.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo aborda uma revisão sobre os principais conceitos considerados importantes para o desenvolvimento deste trabalho. São mostrados os temas relacionados a Recursos Energéticos Distribuídos e algumas de suas tecnologias tais quais: Geração Distribuída, FV, RD, BESS e VEs; HEMS.

2.1. RECURSOS ENERGÉTICOS DISTRIBUÍDOS

Os Recursos Energéticos Distribuídos podem ser definidos como sendo as tecnologias de armazenamento e/ou geração de energia elétrica que estão situados dentro dos limites da área de uma concessionária de distribuição de energia, usualmente junto às unidades consumidoras, atrás do medidor (*behind-the-meter*). Em larga escala, é possível afirmar que esse conceito dos RED contempla: Geração Distribuída; Veículos elétricos e estrutura de recarga; Armazenamento de energia; Resposta da demanda; Eficiência energética. Dessa forma, os REDs proporcionam uma participação mais ativa do consumidor tanto na geração quanto no gerenciamento do consumo da sua própria energia (EPE, 2018).

Ao analisar o comportamento dos REDs no setor elétrico nos últimos anos é possível verificar que houve uma aceleração da inserção dos mesmos nesse setor, que pode ser justificada principalmente pela redução nos custos de investimentos, pelo papel mais ativo dos consumidores nesse campo e pelas constantes transformações que os sistemas de energia elétrica vêm sofrendo.

Essas transformações derivadas da inserção em massa dos REDs irão demandar novas práticas de planejamento da geração de energia e da operação e expansão das redes elétricas. Entretanto, apesar dos desafios impostos com a implantação dos REDs é possível observar que pode haver diversos benefícios associados à sua integração ao sistema. Primeiramente, ao levar em consideração a proximidade entre geração e consumo, os REDs podem proporcionar a redução de perdas elétricas (EPE, 2019a). Adicionalmente, de acordo com Zhao *et al.* (2022) os REDs podem fornecer flexibilidade e promover maneiras de controlar as redes de distribuição.

A redução de perdas elétricas que provém da proximidade entre geração e consumo é a contribuição mais notória dos DER, além da energética. As outras contribuições precisam de

condições específicas como estar situado em locais ideais e operar nas horas certas visando oferecer confiabilidade aos operadores em situações extremas (EPE, 2020).

Uma definição possível para a GD, segundo Ackermann; Andersson; Söder (2001), pode ser dada como uma fonte de energia elétrica que está diretamente conectada à rede de distribuição ou situada no próprio consumidor. Zeynali *et al.* (2020) destacam que as principais motivações para integrar as gerações distribuídas ao sistema de distribuição estão fundamentadas na redução de perdas, melhoria no aspecto de tensão e maior confiabilidade. A utilização de fontes de energias renováveis, como a GD fotovoltaica acarretam a intermitência natural destes recursos de geração e, com isso, geram problema através das incertezas para o processo de planejamento e operação. É importante observar que a utilização de fontes renováveis na tecnologia da GD é considerado promissor porque pode amenizar a crise energética e a poluição ambiental, temas estes que estão em debate no mundo e afetam os seres humanos de maneira direta.

No contexto do Brasil, a GD é definida segundo o Artigo 14º do Decreto Lei nº 5.163/2004:

Considera-se geração distribuída toda produção de energia elétrica proveniente de agentes concessionários, permissionários ou autorizados (...) conectados diretamente no sistema elétrico de distribuição do comprador, exceto aquela proveniente de empreendimento: (i) hidrelétrico com capacidade instalada superior a 30 MW; (ii) termelétrico, inclusive de cogeração, com eficiência energética inferior a 75%.

No Brasil, a GD tem como base o *net metering*, no qual o prosumidor (ou consumidor-gerador) recebe um crédito em sua conta de energia pelo saldo positivo da energia gerada e inserida na rede de energia elétrica, isso ocorre após ter sido feito o desconto de seu consumo, esse processo é conhecido como sistema de compensação de energia. Entretanto, os prosumidores não podem realizar a comercialização entre eles do montante excedido energia gerada por GD. Sempre que a energia gerada não é suficiente para satisfazer as necessidades de demanda do prosumidor, é utilizada a rede elétrica disponível (FGV ENERGIA, 2016) como fonte de energia subsidiária.

A GD, quando bem gerenciada, pode contribuir para operação do sistema sobre o aspecto técnico e econômico com o gerenciamento da energia residencial. Um aspecto importante a ser observado se refere à possibilidade de atendimento da demanda de forma rápida e localizada, já que a construção de grandes usinas geradoras (principalmente às hidrelétricas) se encontra em certo esgotamento (MARQUES *et al.*, 2004). E uma das maneiras de realizar a geração própria de energia é por meio de geração de energia renovável, a exemplo da energia PV com o suporte de armazenamento em baterias e em veículos elétricos.

A energia renovável está se tornando cada vez mais presente no contexto residencial, (REN21- RENEWABLES NOW, 2021) afirmam que em 2019 a energia renovável teve outro ano recorde, onde a capacidade de energia instalada vem crescendo mais de 200 *gigawatts* ao ano (especialmente a energia fotovoltaica) – sendo esse seu maior aumento de todos os tempos.

Ghritlahre *et al.* (2022) afirmam que a energia solar é uma fonte de energia renovável infinita e não prejudica o meio ambiente. Além disso, Shahsavari & Akbari (2018) comparam a geração de energia solar à geração a partir dos combustíveis fósseis, sustentando que a energia solar não polui a atmosfera por meio da liberação de gases nocivos, como CO₂, SO₂ e NO_x (óxidos de nitrogênio), e ainda apresenta benefícios quanto à escala.

Como a energia fotovoltaica produz energia elétrica diretamente da luz solar, torna-se uma fonte de energia importante para atender a demanda de eletricidade nos países em desenvolvimento, de maneira especial em locais rurais e remotos. A contínua redução dos custos dos sistemas fotovoltaicos e o aumento da eficiência acarretam um importante papel dos sistemas de geração fotovoltaica para os próximos anos (SINGH, 2013).

No contexto em que a necessidade de um fornecimento ininterrupto no setor de eletricidade para atender à demanda necessariamente variável, os sistemas de armazenamento se tornam convenientes e, em certa medida, indispensáveis para facilitar descarbonização (INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY, [s.d.]). Uma maneira de realizar o armazenamento de energia é por meio do uso das baterias que, segundo Davis & Hiralal (2016), podem ser empregadas para maximizar os retornos de energia gerados por residências, possibilitando o armazenamento da energia elétrica excedente em períodos de baixa demanda ou quando o custo é menor para posterior utilização em momentos convenientes quanto à sinalização tarifária. Também é possível empregar as baterias para atenuar picos de demanda, aumentando a confiabilidade da rede de distribuição de energia elétrica.

Um dos vários papéis importantes na rede do sistema de energia (*Energy Storage System* - ESS) que o SAE possui é aperfeiçoar e implementar RI utilizando dispositivos de armazenamento de energia baseados em bateria, o BESS (PATHAK; GUPTA, 2018). O BESS pode ser dito como sendo parte integrante de uma rede de energia inteligente sustentável e resiliente (MHAISEN; FETAIS; MASSOUD, 2019). O armazenamento de energia elétrica por baterias guarda uma relação próxima à resposta da demanda pelo fato de que, em alguns casos, é utilizado para otimizar os recursos energéticos e a infraestrutura de distribuição (EPE, 2018). O BESS, juntamente com outras tecnologias, pode permitir maior flexibilidade do sistema, um

componente fundamental à medida que a participação de fontes renováveis variáveis aumenta (INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY, [s.d.]).

Dentre essas fontes renováveis, a energia solar e eólica, são fortemente dependentes dos recursos climáticos com características intermitentes e flutuantes. Para filtrar essas variabilidades, o uso do BESS tem sido amplamente empregado como uma das soluções potenciais, pois possui vantagens como independência geográfica, capacidade de resposta rápida e fornecimento de energia sustentado. No período de implementação do BESS, uma das dúvidas mais importantes é dimensionar a potência e a capacidade do BESS para equilibrar a compensação entre as melhorias técnicas trazidas pela bateria e o custo geral adicional (YANG *et al.*, 2018).

Segundo Li & Wang (2021), as baterias de íon de lítio, chumbo-carbono e sódio-enxofre são as tecnologias de bateria mais empregadas para armazenamento de energia, e com os incentivos nos suportes e melhorias nos processos de fabricação, houve um rápido desenvolvimento na tecnologia de baterias para armazenamento de energia. Adicionalmente, houve uma melhora expressiva nos principais indicadores técnicos, como segurança da bateria, vida útil do ciclo e densidade de energia. O estudo realizado por Nair & Garimella (2010) desenvolve uma avaliação nas perspectivas técnica e econômica sobre as tecnologias de armazenamento de energia em bateria para aplicações renováveis em pequena escala. Os benefícios associados à integração de recursos renováveis também são apresentados, assumindo as vantagens e desvantagens para quatro tipos de tecnologias de armazenamento de energia de bateria discutidas neste artigo são: chumbo-ácido, níquel cádmio (NiCd), hidreto metálico de níquel (NiMH) e íon lítio (Li-ion), com suas altas densidades de energia, maturidade da tecnologia e relativa facilidade de uso. Os autores apontam que as baterias NiMH têm o maior potencial de desenvolvimento em aplicações de integração de energia renovável em pequena escala, desde que os custos iniciais de capital para esta tecnologia sejam reduzidos.

Uma maneira de auxiliar o sistema de armazenamento de energia por bateria é utilizar os veículos elétricos, que são veículos acionados por no mínimo um motor elétrico e podem ser classificados em cinco categorias, conforme a forma como a energia elétrica é disponibilizada a bordo, sendo elas: VE a bateria, quando a energia é abastecida por um conjunto de baterias que são recarregadas na rede elétrica, portanto, a autonomia de tais veículos depende diretamente da capacidade da bateria; VE híbrido (VEH), onde se tem um motor de combustão interna e um trem de força elétrico para alimentar o veículo. Estes veículos também fazem uso do sistema de propulsão elétrica quando a demanda de energia é baixa, possibilitando que seja

reduzido o consumo de combustível, porque o motor permanece totalmente desligado durante a marcha lenta, como engarrafamentos; VE de célula a combustível, abastecido por células combustível, com equipamento eletroquímico que transforma a energia do hidrogênio diretamente em eletricidade; VE híbrido *plug-in* (PHEV), no qual é empregado tanto um motor de combustão interna quanto um trem de força elétrico, como um VEH, porém a diferença entre eles é que o PHEV faz uso da propulsão elétrica como principal força motriz, o que exige uma capacidade de bateria maior que os HEV; os PHEV iniciam seu funcionamento no modo 'todo elétrico', funcionam com eletricidade e quando as baterias estão com pouca carga, o PHEV aciona o motor de combustão interna para carregar a bateria ou fornecer um impulso, para este caso o motor de combustão interna é usado para estender o seu alcance (UN-NOOR et al., 2017).

Dentre as vantagens que os VEs possuem, existe a possibilidade de estarem conectados à rede elétrica de uma residência, por meio do modo de operação chamado sistema V2G. Nesse sistema, as baterias dos VE podem ser consideradas como sendo recursos energéticos distribuídos para a rede elétrica: é possível usar a energia armazenada na bateria dos veículos em horários maior de demanda por energia, contribuindo para a operação da rede elétrica em horários de pico, como em um mecanismo de gestão de demanda. Outra vantagem do uso dos VE deriva da utilização de suas baterias como alternativa de armazenamento descentralizado para fontes geradoras intermitentes, como a geração eólica e solar de pequeno porte. De modo particular, os EVs em sistemas V2G representam uma alternativa que contribui para a maior disseminação dos recursos energéticos distribuídos. Entretanto, para que os EVs possam exercer completamente esse papel, é necessário que ocorra o crescimento evolutivo das RI (FGV ENERGIA, 2016).

Ainda mais expressivas são as oportunidades de atuação dos EVs pelo lado da demanda, como carga móvel em tempo e espaço, ao se ter uma maior capacidade da bateria elétrica do veículo com conexão na rede elétrica. Torna-se possível armazenar quase seis vezes o consumo diário de uma residência brasileira média ao se ter um veículo com uma bateria de cerca de 30 kWh. Conforme apresentado no estudo da Rocky Mountain Institute (2016), as concessionárias de energia elétrica têm a possibilidade de utilizar novas comunicações e tecnologias de controle, juntamente com as estruturas de incentivo e tarifas inovadoras para aproveitar o potencial de valor do VE com recarga inteligente para favorecer os clientes, concessionárias, proprietários de veículos e sociedade em geral.

Dentre os conjuntos de tecnologias existentes do RED, destaca-se também a RD que, segundo ARENA (2022), pode ser definida como a diminuição voluntária ou mudança do uso de eletricidade pelos clientes, podendo auxiliar a manter uma rede elétrica estável, equilibrando sua oferta e demanda de eletricidade. Os sistemas elétricos podem ser flexíveis e confiáveis, com a ajuda da RD, o que é benéfico se eles contiverem parcelas crescentes de energia renovável variável. Uma forma rápida e econômica de se obter a redução da demanda durante os períodos de pico é utilizar a RD, como uma alternativa ao aumento da energia gerada e a consequente construção de novas usinas. De acordo com Bertoldi; Zancanella; Boza-Kiss (2016), a resposta à demanda tem a capacidade de adequar o sistema e diminuir substancialmente a necessidade de investimento para atender a demanda máxima, deslocando o consumo para momentos de baixa demanda e acrescentando estabilidade ao sistema.

Com a resposta à demanda, os consumidores podem ter uma oportunidade de desempenharem um papel significativo na operação da rede elétrica, reduzindo ou alterando seu uso de eletricidade durante os períodos de pico de demanda em resposta a tarifas baseadas no tempo ou outras formas de incentivos financeiros. Alguns planejadores e operadores de sistemas elétricos utilizam os programas de resposta à demanda como alternativas de recursos para equilibrar oferta e demanda. Esses programas possibilitam que haja uma redução no custo da eletricidade nos mercados atacadistas e, por sua vez, levar a tarifas mais baixas no varejo. As formas para terem os clientes envolvidos nos esforços de resposta à demanda incluem a oferta de taxas baseadas no tempo, como preços de tempo de uso, preços de pico variáveis, preços de pico críticos, preços em tempo real e descontos de pico críticos (OFFICE OF ELECTRICITY, [s.d.]).

A SG, em conjunto com a propagação dos medidores inteligentes (*Smart Meters* - SM) possibilitam uma comunicação bidirecional, que permite o envio de dados em duas vias (entre a concessionária e os pontos de consumo) mudará a RD, aperfeiçoando a capacidade de geradores e consumidores de eletricidade a se comunicarem e decidirem sobre o momento e a forma de produzir e consumir energia. Possibilitando, por meio dessa tecnologia, que os consumidores possam migrar de um modelo de resposta a demanda baseado em eventos, onde o operador emite uma ordem de redução de consumo, para um modelo de resposta a demanda mais contínuo, que proporciona ao consumidor conseguir visualizar o sinal para mudar sua demanda a todo instante, tornando-se um agente ativo do sistema (EPE, 2019).

2.2. SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE ENERGIA RESIDENCIAL

Com advento da era das RI e o aparecimento das infraestruturas de medição avançada, infraestruturas avançadas de comunicação bidirecional e informação, sistemas de armazenamento de energia e redes domésticas, observou-se a inovação nos padrões da utilização de eletricidade e conservação de energia nas instalações de consumo. Sob o paradigma de RI sustentável, a *smart home* e o seu respectivo sistema de gerenciamento de energia exercem uma importante função para melhorar a economia, a eficiência, a conservação de energia e a confiabilidade para sistemas de distribuição (ZHAO *et al.*, 2022). O HEMS pode ser definido como um sistema ideal que fornece a possibilidade de realizar o gerenciamento de energia, monitorando e gerenciando de maneira eficiente os sistemas de consumo, geração e armazenamento de energia elétrica em residências (HOU *et al.*, 2019a). O HEMS pode operar conforme várias possibilidades de critérios, incluindo condições climáticas, os custos de energia, sistemas de armazenamento de energia por baterias e perfis de carga e geração (ZAFAR; BAYHAN; SANFILIPPO, 2020).

Na prática, o sistema faz uma supervisão dos dados de energia, como exemplo: custo previsto, consumo em tempo real e a possibilidade de ativar ou desativar um eletrodoméstico. Dessa forma, os usuários do sistema são capazes de decidir os momentos para diminuir a intensidade do uso ou desligar o dispositivo para obter uma economia no consumo em horário de pico de energia (KWON; LEE; KIM, 2022). Como o HEMS possui a capacidade de ajudar na gestão da demanda de eletricidade residencial e de tornar mais potente o uso dos RED para gerar e armazenar energia, é possível fazer a otimização do consumo de energia elétrica dos sistemas de distribuição de energias residências. A partir da minimização dos custos energéticos sem interferir no conforto dos usuários (Shareef *et al.* (2018)), o gerenciamento pelo lado da demanda, a reposta a demanda, o deslocamento da carga e o corte do pico de carga são exemplos que podem ser considerados como soluções para algumas perturbações do sistema elétrico, para o operador da rede e, portanto, ajudam a impulsionar os consumidores no emprego de uma solução HEMS mais robusta e inteligente.

Com estes conceitos apresentados, é esperado que o consumidor possa participar de maneira efetiva e direta em seu sistema de energia elétrica. Para que isso ocorra é necessário que se tenha um sistema de gerenciamento de recursos energéticos eficiente, redundando nas características inerentes do HEM e no consequente fomento do uso de DERs.

Segundo (TUSHAR; ZEINEDDINE; ASSI, 2018), ao se utilizar o HEMS em larga escala juntamente com as redes inteligentes, é possível compor a nova geração de distribuição

da rede elétrica, porém fazendo-a operar de forma descentralizada e de maneira mais inteligente.

2.2.1. Soluções Comerciais

A integração de dispositivos domésticos com HEMS apresenta alguns desafios e requer a colaboração de proprietários, serviços públicos e indústrias. Os proprietários precisam de uma melhor consciência do consumo de energia e seu efeito sobre o meio ambiente. Os serviços públicos devem fornecer informações necessárias e úteis ao proprietário. Os dispositivos domésticos comerciais devem oferecer as comunicações e funcionalidades adequadas. Uma vez que cada dispositivo suporta um protocolo de comunicação específico, o HEMS deve ser capaz de facilitar a comunicação entre diferentes dispositivos (EUROPEAN COMMISSION, 2018).

Algumas empresas estão desenvolvendo alguns dispositivos como soluções comerciais para a SG. Como por exemplo a ABB (2022) que desenvolveram um sistema de automação residencial que possibilita que os dispositivos da SH não só tornem a vida dos moradores mais segura, mais divertida e mais conveniente, mas também permitam que os moradores da SH possam economizar energia e dinheiro. Alguns dos dispositivos comerciais que são apresentados no sistema de automação residencial são: **Controle de cegos**, que ao ser integrado ao HEMS na SH eles ajudam na interação efetiva com a iluminação, aquecimento e ar-condicionado visando uma maior eficiência energética; **Função tudo desligado**, permite que o usuário possa desligar facilmente todas as luzes da residência com somente um dedo no botão; **Aquecedor e ar-condicionado**, possibilita que a residência e todos os seus cômodos estejam com a temperatura ideal todos os dias; **Sistema Solar**, uma combinação entre a solução de armazenamento inteligente para seu sistema fotovoltaico e o sistema de automação residencial inteligente que permite ao usuário ter maior controle sobre o uso de sua energia, quando quiser e onde estiver; e por fim, tem-se o Carregamento de carro elétrico utilizando uma tomada inteligente EVLunic AC que fornece um ponto de carregamento de veículo elétrico de alta qualidade e econômico. O carregador pode ser montado na parede ou em um poste.

Ainda nas soluções comerciais, também foi verificada formas de auxiliar no HEMS para a realizar a gestão dos dispositivos inteligentes das SH. Uma dessas formas é o **Wiser Energy** que é um sistema residencial inteligente que realiza o monitoramento do consumo de energia da casa e alerta o usuário caso ocorra anomalias relacionadas a energia. O sistema também permite que o morador possa monitorar sua produção de energia solar e possa monitorar algum

equipamento crítico, possibilitando a notificação ao usuário caso haja algum problema com a geladeira, bomba de piscina ou instalação fotovoltaica. De maneira mais detalhada, o sistema *Wiser Energy* tem as seguintes funções: Mostra o consumo de energia por medidor, eletricidade, gás e água, requerendo porém um medidor para cada função; Mostra a produção de energia solar e o fluxo de energia da residência; Mostra o consumo de energia por cômodo e aparelho; Supervisiona os gastos com energia; Avalia o consumo com gráficos horários, diários e mensais; Fornece relatórios de consumo de energia em tempo real; Faz uma comparação entre as tendências de consumo com os meses anteriores; Possibilita a inserção de detalhes e tarifas do provedor de serviços; Emite alertas e notificações na presença de anomalias, bem como também quando metas de energia pré-estabelecidas são alcançadas e quando ocorrem interrupções de energia, limites de contrato são alcançados (SCHNEIDER ELECTRIC, 2022).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica realizada nesta dissertação. A revisão foi feita utilizando a metodologia de mapeamento sistemático da literatura.

3.1. ESTUDO DE MAPEAMENTO SISTEMÁTICO

Esta seção utiliza a metodologia de Estudo de Mapeamento Sistemático – EMS (*Systematic Mapping Study*), apresentado por Aranda *et al.* (2020) e Rossi & Chren (2020), para realizar uma revisão da literatura através de um levantamento de trabalhos que investigam quais abordagens são utilizadas para determinar o planejamento de operações de recursos energéticos distribuídos em residências inteligentes. Um EMS é usado para explorar uma área de pesquisa, identificando a quantidade e a frequência das publicações ao longo do tempo para ver as tendências, o tipo de pesquisa e os principais resultados disponíveis. Para realizar o EMS é necessário seguir alguns passos: Definir as questões de pesquisa, realizar o Processo de Pesquisa, fazer o Processo de Filtragem e apresentar os Resultados e Análises (são respondidas as questões de pesquisa e as contribuições para este estudo).

3.1.1. Definição das questões de pesquisa

Foram definidas duas questões gerais (*General Question - GQ*), três questões específicas (*Specific Question - SQ*) e uma questão estatística (*Statistical Question - STQ*). As questões gerais buscaram explorar as informações básicas sobre a utilização da rede inteligente nas residências. As questões específicas têm como objetivo compreender os detalhes quantitativos dos artigos selecionados quanto a utilização da rede inteligente. A questão estatística objetiva definir os dados cronológicos, local onde foram publicados os artigos e verificar a quantidade das publicações. A Tabela 1 expõe todas as questões definidas no mapeamento.

Tabela 1 – Apresentação das questões definidas para a pesquisa.

TIPO	QUESTÕES DA PESQUISA
------	----------------------

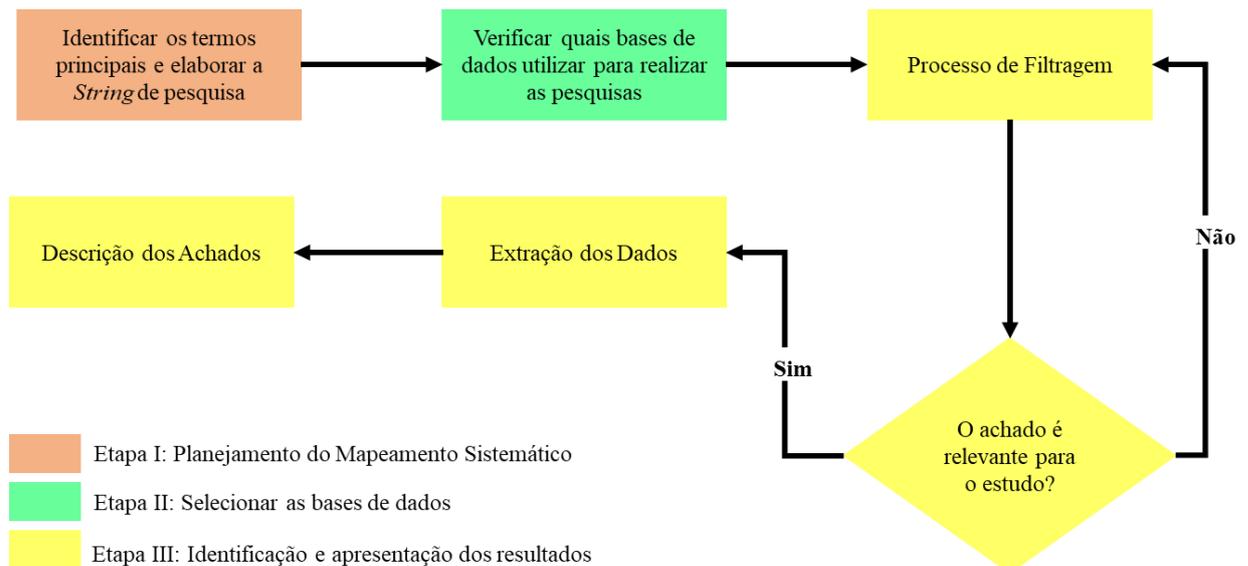
TIPO	QUESTÕES DA PESQUISA
<i>General Question</i>	
GQ1	Quais são as abordagens que envolvem o uso de recursos energéticos distribuídos e flexíveis em residências?
GQ2	Quais são as formas de integração dos recursos energéticos distribuídos e flexíveis com a rede elétrica, no conceito de redes inteligentes?
<i>Specific Question</i>	
SQ1	Quanto ao gerenciamento de recursos energéticos distribuídos e flexíveis em residências, quais são as abordagens mais utilizadas?
SQ2	Como são tratadas as condições estocásticas no gerenciamento de recursos energéticos distribuídos e flexíveis em residências?
SQ3	Quais são as ferramentas para análise de dados no gerenciamento de recursos energéticos distribuídos e flexíveis em residências?
SQ4	Quais as discretizações adotadas no gerenciamento de recursos energéticos distribuídos e flexíveis em residências?
<i>Statistical Question</i>	
STQ1	Quais são os períodos que envolvem as GQ1-GQ2 e SQ1-SQ3?

Fonte: Autora (2023).

3.1.2. Processo de pesquisa

Após a definição das questões de pesquisa, iniciou-se o processo de pesquisa de acordo com a estrutura apresentada na Figura 2. Deve ser destacado que o processo de filtragem possui um fluxograma, apresentado na Figura 3 que detalha cada passo de sua realização.

Figura 2 – Framework da estrutura das etapas do processo de pesquisa.



Fonte: Autora (2023).

A primeira etapa identificou os termos principais e seus sinônimos que são destinados a encontrar as respostas às perguntas da Tabela 1. Esses termos são: *smart grids; distributed energy resources; flexible energy resources; smart homes; home energy management; smart home energy management; algorithm; optimization; uncertainties; stochastic; demand response; optimal operation*. Essa etapa também contém, a elaboração da *String* de pesquisa que foi feita com a combinação dos termos principais e os operadores booleanos como "AND" e "OR".

A etapa dois foi responsável por selecionar os bancos de dados relevantes para a área de estudo, com o propósito de aplicar a *String* de pesquisa. Na Tabela 2 também são apresentadas as bases de dados que foram escolhidas para serem usadas na pesquisa e a *String* de pesquisa juntamente com o número de documentos encontrados em cada base. Deve ser observado que todos os termos que fazem parte da *String* foram usados para as pesquisas em todas as bases de dados considerando as particularidades de cada uma delas.

Tabela 2 – Bases de dados e String de pesquisa.

STRING DE PESQUISA	Bases de Dados			
	Web of Science	IEEE Explore	Scopus	Science Direct
("Smart grids" or "smart energy") and ("smart home" or "smart homes")	4.094	3.056	1.925	1.642

Fonte: Autora (2023).

<i>("Home energy management" or "smart home energy management") and "optimization"</i>	618	353	449	329
<i>("Home energy management" or "smart home energy management") and "optimal operation"</i>	210	63	30	95
<i>("Home energy management" or "smart home energy management") and "demand response"</i>	344	293	212	263
<i>("Home energy management" or "smart home energy management") and ("uncertainty" or "uncertainties" or "stochastic")</i>	255	128	198	303
<i>("Home energy management" or "smart home energy management") and "distributed energy resources"</i>	206	106	77	252
<i>("Home energy management" or "smart home energy management") and "flexible energy resources"</i>	29	12	10	184
<i>("Home energy management" or "smart home energy management") and ("uncertainty" or "uncertainties" or "stochastic") and ("algorithm" or "optimization" or "optimal operation")</i>	141	86	142	169
<i>("Home energy management" or "smart home energy management") and ("uncertainty" or "uncertainties" or "stochastic") and ("algorithm" or "optimization" or "optimal operation") and ("demand response")</i>	45	17	62	201

A busca realizada nas bases de dados exigiu o uso de um recurso de pesquisa avançada. Como resultado, sem a implementação de critérios de inclusão ou exclusão na realização da busca, foi obtido um total de 16.599 estudos.

A partir desse resultado, torna-se oportuna a realização de um processo de filtragem dos trabalhos encontrados de modo a resumir para um número representativo e sobretudo coerente com os objetivos definidos. A etapa final definiu os filtros do estudo e a identificação dos resultados.

3.1.3. Processo de filtragem

Após a obtenção dos estudos mediante a *String* de busca, foi realizado o processo de filtragem das obras com o propósito de selecionar aquelas que melhor enfocam e que são mais relevantes para a área de pesquisa deste estudo.

Foram definidos os seguintes critérios de inclusão (CI):

CI 1: Somente estudos publicados em conferências e periódicos (os artigos em conferência não podem superar 20% do total dos estudos selecionados);

CI 2: Estudos sobre a aplicação de técnicas em sistemas reais, experimentos ou simulações;

CI 3: Os estudos devem abordar os termos principais da pesquisa: *Smart grids; distributed energy resources; flexible energy resources; smart homes; Home energy management; smart home energy management; algorithm; optimization; uncertainties; stochastic; demand response; optimal operation;*

CI 4: Estudo deve ser um documento completo;

CI 5: Estudos de conhecimento prévio dos autores que não foram encontrados nas pesquisas iniciais.

Para eliminar os estudos, os seguintes critérios de exclusão (CE) foram aplicados:

CE 1. Estudos que não estão escritos em inglês;

CE 2. Estudos em formatos de apresentações, slides e pôsteres;

CE 3. Estudos publicados em formato de TCC's, dissertações, teses e capítulos de livros;

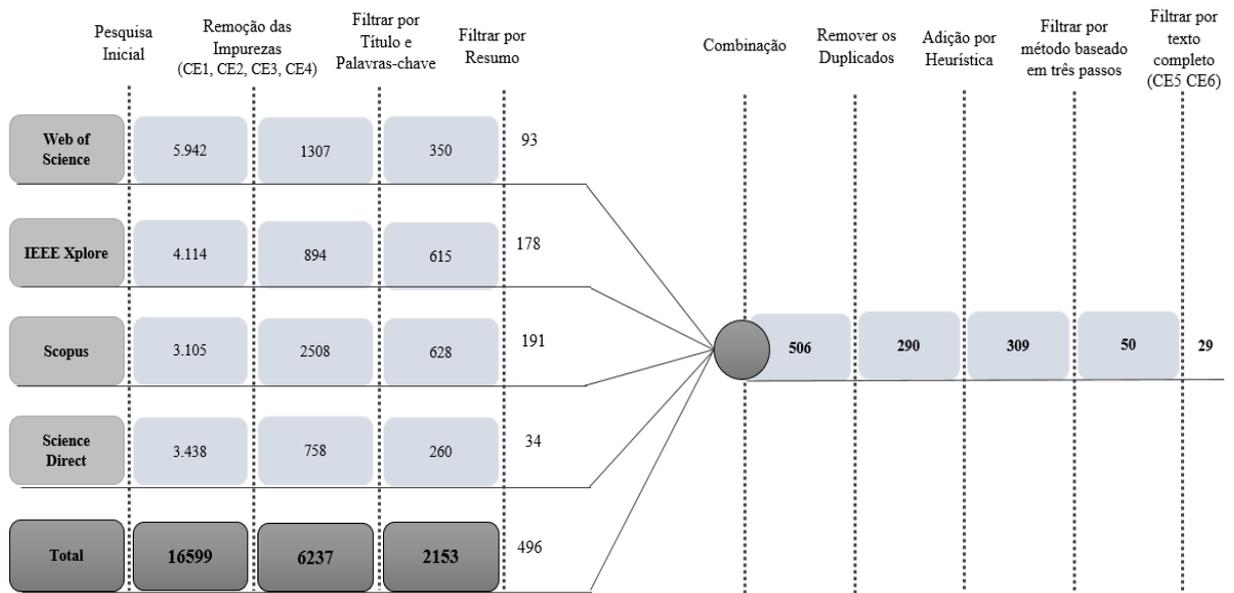
CE 4. Estudos publicados antes de 2010. Salvo algumas exceções, como matérias que podem ser considerados de suma importância para a realização deste estudo;

CE 5. Estudos que não envolvem redes inteligentes e casas inteligentes;

CE 6. Estudos que não tenham nenhuma relação com as questões pesquisadas.

Os critérios de inclusão e exclusão possibilitaram selecionar os trabalhos mais relevantes e eliminar aqueles que não são da área de interesse deste estudo. O processo de filtragem dos artigos, apresentado na Figura 3, teve início com a retirada dos artigos que não atendiam aos critérios de exclusão CE 1, CE 2, CE 3, CE 4. Em seguida, foi elaborado um filtro baseado no título e palavras-chave dos artigos examinados e posteriormente, foi elaborada a filtragem conforme o conteúdo do resumo. O próximo filtro representa uma abordagem composta por três etapas estabelecida por Keshav (2007). E o último passo compreende a leitura do texto na íntegra, considerando os critérios de exclusão CE 5 e CE 6.

Figura 3 – Processo de filtragem.



Fonte: Autora (2023).

3.1.4. Resultados e Análises

O processo de filtragem final resultou em 29 estudos escolhidos de 16.599 trabalhos pesquisados no início da coleta de dados para mapeamento. Os artigos selecionados na realização do mapeamento sistemático (apresentados na Tabela 3) identificados com os dados dos autores, título, onde foi publicado e o tipo de publicação, foram analisados de acordo com seus objetivos. Os resultados de cada questão da pesquisa são apresentados nesta subseção 2.3.4.

Tabela 3 – Relação dos artigos mapeados.

Autores	ID do Estudo	Publicado em	Tipo de Publicação	Base de dados	GQ1	GQ2	SQ1	SQ2	SQ3	SQ4
Azami, Alizadeh & Abapour (2021)	1	11th Smart Grid Conference	Conference	IEEE	SIM	SIM	SIM	NÃO	SIM	SIM
Amer <i>et al.</i> (2021)	2	Energies	Journal	Web of Science	SIM	SIM	NÃO	NÃO	SIM	SIM
Imran <i>et al.</i> , (2020)	3	IEEE Access	Journal	IEEE	SIM	SIM	SIM	NÃO	SIM	SIM
Huang, Tian & Wang (2015)	4	International Journal of Electrical Power and	Journal	Scopus	SIM	NÃO	SIM	SIM	SIM	SIM

Autores	ID do Estudo	Publicado em	Tipo de Publicação	Base de dados	GQ1	GQ2	SQ1	SQ2	SQ3	SQ4
		Energy Systems								
Sangswang & Konghirun (2020)	5	Transactions on Industry Applications	Journal	Scopus	SIM	SIM	NÃO	NÃO	SIM	SIM
Merdanoğlu <i>et al.</i> (2020)	6	Electric Power Systems Research	Journal	Web of Science	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Mak & Choi (2020)	7	Applied Energy	Journal	Scopus	SIM	NÃO	SIM	NÃO	SIM	SIM
Celik <i>et al.</i> (2018)	8	Transactions on Smart Grid	Journal	Scopus	SIM	SIM	SIM	NÃO	SIM	SIM
Javadi <i>et al.</i> (2020)	9	Energy	Journal	Science Direct	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Akbari-Dibavar <i>et al.</i> (2020)	10	Computers & Industrial Engineering	Journal	Science Direct	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Zhang <i>et al.</i> (2015)	11	Mathematical Problems in Engineering	Journal	Web of Science	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Tantawy, Amer & M.Fayez (2022)	12	Ain Shams Engineering Journal	Journal	Scopus	SIM	SIM	SIM	NÃO	SIM	SIM
Jindal, Singh & Kumar (2018)	13	Transactions on Industrial Electronics India	Journal	Web of Science	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	SIM
Pal & Kumar (2018)	14	International Conference on Power Electronics	Conference	IEEE	SIM	SIM	SIM	NÃO	SIM	SIM
Erdinc <i>et al.</i> (2015a)	15	Applied Energy	Journal	Scopus	SIM	SIM	SIM	NÃO	SIM	SIM
Erdinc <i>et al.</i> (2015b)	16	Transactions on Smart Grid	Journal	Scopus	SIM	SIM	SIM	NÃO	SIM	SIM
Lu, Zhang & Lü (2020)	17	Energy Reports	Journal	Web of Science	SIM	SIM	SIM	NÃO	SIM	SIM
Koltsaklis <i>et al.</i> (2019)	18	International Conference on the European Energy Market	Conference	IEEE	SIM	SIM	SIM	NÃO	SIM	SIM

Autores	ID do Estudo	Publicado em	Tipo de Publicação	Base de dados	GQ1	GQ2	SQ1	SQ2	SQ3	SQ4
Li <i>et al.</i> (2021)	19	Power System and Green Energy Conference	Journal	Science Direct	NÃO	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	SIM
Luo <i>et al.</i> (2020)	20	Transactions on Smart Grid	Journal	IEEE	SIM	SIM	SIM	NÃO	SIM	SIM
Tutkun <i>et al.</i> (2021)	21	Energies	Journal	Scopus	SIM	NÃO	SIM	NÃO	SIM	SIM
Alilou, Tousi & Shayeghi (2021)	22	Electrical Engineering	Journal	Scopus	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Ur Rehman, Yaqoob & Khan (2022)	23	International Journal of Electrical Power and Energy Systems	Journal	Science Direct	SIM	SIM	SIM	NÃO	SIM	SIM
Zamanloo <i>et al.</i> (2021)	24	Sustainable Cities and Society	Journal	Web of Science	SIM	SIM	SIM	NÃO	SIM	SIM
Hou <i>et al.</i> (2019)	25	IEEE Access	Journal	IEEE	SIM	SIM	SIM	NÃO	SIM	SIM
Wu <i>et al.</i> (2018)	26	Transactions on Smart Grid	Journal	IEEE	SIM	NÃO	NÃO	SIM	SIM	SIM
Shakeri <i>et al.</i> (2017)	27	Energy and Buildings	Journal	Science Direct	NÃO	SIM	NÃO	SIM	SIM	SIM
Zheng <i>et al.</i> (2018)	28	Transactions on Sustainable Energy	Journal	Scopus	SIM	NÃO	SIM	SIM	SIM	SIM
Yang & Wang (2021)	29	Energy Reports	Journal	Scopus	SIM	SIM	SIM	NÃO	SIM	SIM

Fonte: Autora (2023).

3.1.4.1. Exposição dos artigos selecionados (respondendo as questões)

Nesta subseção serão respondidas as questões de acordo com as informações retiradas dos artigos selecionados com a realização do mapeamento.

GQ1: Quais são as abordagens que envolvem o uso de recursos energéticos distribuídos e flexíveis em residências?

Para realizar o gerenciamento dos recursos energético distribuídos e flexíveis, diferentes abordagens foram utilizadas em diferentes estudos selecionados para compor este mapeamento, essas abordagens são descritas brevemente abaixo:

- No estudo de Azami, Alizadeh & Abapour (2021) é realizada uma modelagem matemática contendo todos os recursos energéticos distribuídos integrados, em que o problema de gestão de energia é formulado como uma PLIM visando minimizar o custo de energia e otimizar os sistemas de produção e consumo de energia em uma casa inteligente e foi considerado no problema a programação das operações desses recursos de energia de uma casa inteligente típica com base diária. Para mostrar o desempenho adequado do método utilizado, dois estudos de casos foram demonstrados, o primeiro inclui dois veículos elétricos com armazenamento no sistema prosumer, uma casa inteligente no sistema de consumo, uma usina de cogeração, uma usina externa, uma microturbina eólica e um painel fotovoltaico na parte de produção e o segundo inclui um VE com armazenamento na parte prosumer, uma casa inteligente na parte de consumo e uma usina externa, uma micro-turbina eólica e um painel PV na parte de produção.
- O estudo feito de Amer *et al.* (2021) trata do problema RD em um contexto de larga escala para resolver problemas de otimização de demanda de edifícios residenciais do ponto de vista do usuário final e da concessionária. Para alcançar seus objetivos, foi proposto um HEMS incorporado a um modelo de otimização multiobjetivo para se obter o equilíbrio entre os benefícios tanto para o usuário final e quanto para o operador, onde, os clientes só podem realizar ações de RD com contratos com operadoras de serviços públicos. O nível de conforto do comportamento dos clientes e um custo de degradação que reflete a perda de vida (*Loss-of-Life* - LoL) do transformador de distribuição fazem parte do problema de otimização multiobjetivo.
- O estudo de Imran *et al.* (2020) busca a solução para o problema de gerenciamento de energia com o propósito de reduzir o custo de energia elétrica da área residencial, minimizar as emissões de carbono, reduzir a proporção pico para média (*Peak-to-Average Ratio* - PAR) e maximizar o conforto do usuário. Para enfrentar esses problemas, os autores propõem um controlador programável de gerenciamento de energia baseado em heurística (*heuristic-based programmable energy management controller* - HPEMC) para gerenciar o consumo de energia em edifícios residenciais integrados as fontes de energia renováveis (*Renewable Energy Sources* – RES) que

continha diferentes aparelhos inteligentes. A gestão de energia é feita com o uso de um controlador que realiza a programação dos aparelhos de acordo com o sinal de preços e geração de eletricidade. Os autores assumiram o horizonte do sistema de gestão de energia de um dia.

- Na pesquisa de Huang, Tian & Wang (2015) foi apresentado um problema de RD para programar a operação de eletrodomésticos para economizar custos de energia, considerando a conveniência do cliente e as características dos aparelhos elétricos. Para solucionar o problema, é empregada uma formulação de programação não linear de otimização discreta e contínua, assumindo neste modelo que a maior parte dos aparelhos elétricos estejam conectados à rede e controlados pelo sistema de gestão de energia doméstica. É feito o registro do comportamento real dos aparelhos pelo módulo de monitorização, as variáveis ambientais relativas e a potência da geração de PV são calculadas pelo módulo de previsão de acordo com os dados de entrada da unidade de monitorização. Posteriormente ao processo de otimização, a unidade de lógica de controle envia os horários ideais planejados para o uso dos aparelhos e controla diretamente os aparelhos que não sofrem interrupções e dispositivos térmicos.
- Sangswang & Konghirun (2020) propõe um HEMS para casos pré-determinados que tratam de técnicas de RD, para controlar operações de armazenamento baseado em energia solar e residências que possuem os EV. A implementação do sistema proposto é feita para demonstrar a precificação em tempo real e os esquemas de redução de carga de emergência. Para isso, é feito um estudo experimental dos algoritmos de controle para verificar como são as interações entre as baterias, a energia PV, a rede e as cargas dos clientes em vários casos propostos pelos autores.
- Um problema de agendamento incorporado a um HEMS que visa encontrar o menor custo de energia, realizar a produção de energia a partir de fontes renováveis, atender as exigências de utilização de cada aparelho doméstico, obedecer a capacidade de armazenamento de baterias e as restrições de rede é abordado por Merdanoğlu *et al.* (2020), que realizam modelagem e solução por meio de um modelo matemático encontrando os melhores horários para o HEMS, que, devido às incertezas na oferta, na demanda e no preço da eletricidade, utilizam a abordagem de otimização estocástica durante o desenvolvimento do modelo.
- Mak & Choi (2020) propõe um *framework* de otimização que coordena as operações de um HEMS em uma rede de distribuição de baixa tensão e a otimização Volt/Var (VOV)

em uma rede de distribuição de média tensão por meio do consumo flexível de eletricidade e produção de energia. As operações ótimas de eletrodomésticos e recursos energéticos distribuídos são programadas no HEMS em concordância com a programação e o nível de conforto definido pelo prosumer. Com as respostas da realização do cálculo para se obter os melhores horários de consumo de energia dos vários HEMSs, o agregador HEMS recalcula-os ao interagir com o VVO, que monitora e controla a rede de distribuição de forma eficiente.

- Um algoritmo para fazer a gestão energética para o dia seguinte para a coordenar casas inteligentes que possuem fontes de energia renováveis e sistemas de armazenamento de energia em áreas vizinhas é formulado por Celik et al. (2018), para solucionar o problema de coordenação descentralizada para o agendamento de eletrodomésticos e compartilhamento de energia para obter a minimização da conta de eletricidade dos consumidores sobre preços dinâmicos. O algoritmo de compartilhamento de energia se concentra em aumentar o uso de fontes renováveis, controlando as unidades de armazenamento, e, para modelar as casas inteligentes, o agregador e a concessionária é utilizado um sistema multiagente, e o problema de otimização é resolvido de forma descentralizada por agentes domésticos com um algoritmo genético.
- Javadi et al. (2020) abordam o problema de redução da conta de energia do usuário final. Para solucionar o problema foi proposto um HEMS que realiza o auto escalonamento dos aparelhos domésticos ligados a rede de um usuário final residencial no qual, o problema foi formulado como um problema de otimização estocástica com um único objetivo em uma estrutura de PLIM buscando que a solução ideal possa ser encontrada em uma alta taxa de convergência. Com este fim, o utilizador final foi equipado com ativos de auto geração energética para tornar possível a transação de energia com a rede da concessionária e a redução dos custos. Os programas de resposta a demanda – PRD (*Demand Response Programs*) possibilitam que usuários finais sejam ativos no sistema.
- Akbari-Dibavar et al. (2020) apresentam o problema de gestão energética de uma casa inteligente nos mercados da energia do dia seguinte em tempo real, levando em consideração as incertezas dos preços da energia e da produção de energia fotovoltaica. Para solucionar esse problema, foi proposto um modelo híbrido de otimização robusta-estocástica, em que, uma abordagem de otimização robusta e flexível (*Robust Optimization Approach* - ROA) é empregada para criar um equivalente tratável do

problema e gerenciar a incerteza dos preços de mercado do dia seguinte quando a geração fotovoltaica é assumida no pior cenário.

- Devido ao problema de ter um algoritmo que controla apenas partes do HEMS, em vez do sistema geral, não é possível obter os melhores resultados para o sistema, além de que o algoritmo de otimização de objetivo único que minimiza o custo da eletricidade não pode quantificar o nível de conforto do usuário e não pode fazer uma troca entre o custo da eletricidade e o nível de conforto de forma conveniente, Zhang et al. (2015) propuseram uma estrutura de HEMS que consiste em rede, carga, recurso renovável e bateria. Nesta estrutura, o usuário pode vender a eletricidade gerada por fontes renováveis ou armazenada em baterias para a rede, com fins lucrativos. Um conjunto de indicadores para verificar o nível de conforto do usuário é proposto para diferentes eletrodomésticos. Com base nesses indicadores, é construído um modelo de programação ótimo multiobjetivo, que minimiza o gasto monetário e maximiza o nível de conforto do usuário simultaneamente.
- O problema de redução do custo de energia elétrica, minimização do PAR, maximização da satisfação do cliente e do bem estar social, onde a programação dos aparelhos maximiza o benefício social, foram abordados por Tantawy, Amer & M.Fayez, (2022), que propuseram um modelo HEMS para casas inteligentes com FV- RER e unidades de armazenamento de baterias – UAB (*Battery Storage Units*) e agendamento de vários tipos de eletrodomésticos em diferentes tipos de usuários residenciais (Usuário Não Ativo, Usuário Semi-ativo e Usuário Totalmente Ativo). E para a validação desses algoritmos, dois casos foram usados: primeiro usando um sistema de residência única e o segundo usando sistema de várias residências (três residências) com e sem integração HES (FV-RER e UAB).
- Visando resolver o problema da redução da carga de pico, considerando as restrições do consumidor, como o conforto do usuário e a vontade de participar no gerenciamento dos recursos energéticos, Jindal, Singh & Kumar (2018) propõem um novo esquema de gerenciamento de RD analítico de dados para carga residencial. O esquema proposto é baseado na análise dos dados de consumo dos consumidores, que são coletados de residências inteligentes para os quais fatores como fator de ajuste de eletrodomésticos, índice de prioridade de eletrodomésticos, prioridade de redução de eletrodomésticos, entre outros, foram desenvolvidos e os usuários não precisam especificar seus horários.

- O problema de otimização da gestão energética de uma única casa equipada com vários ativos, incluindo eletrodomésticos, VEs, sistema de armazenamento de energia por bateria e geração FV de pequena escala é apresentado por Pal & Kumar (2018). A modelagem proposta é desenvolvida como PLIM e o consumidor de eletricidade é registrado para programas de resposta à demanda baseados em preços em tempo real pela entidade de serviço de carga, no modelo o BESS e o FV são empregados para carregar eletrodomésticos e, se houver energia excedente disponível, ela pode ser realimentada na rede.
- Erdinc et al. (2015a) desenvolveram um dimensionamento de GD adicional e sistemas de armazenamento de energia a serem aplicados em residências inteligentes que, devido às atividades de RD, têm um perfil de demanda diária diferente quando comparadas com perfis residenciais normais. O estudo é realizado usando uma estrutura de PLIM para modelagem de HEMS e dimensionamento técnico-econômico. Além disso, são realizadas diferentes análises de sensibilidade considerando os impactos da variação dos insumos econômicos no modelo fornecido.
- Erdinc et al. (2015b) propõe uma avaliação colaborativa de estratégias de RD baseadas em preços dinâmicos e limitação de PAR e um sistema distribuído de geração de energia renovável em pequena escala. Estão previstos os modos de operação *vehicle-to-home* (V2H) e V2G capacidades de um VE junto com o comércio de energia bidirecional de VE e SAE, a partir de uma modelagem baseada em PLIM de uma estrutura HEM. A energia proveniente da rede tem um custo em tempo real, enquanto que para a energia vendida de volta à rede é assumida uma taxa fixa.
- Lu, Zhang & Lü (2020) abordam um modelo HEMS que minimiza o pico de carga e o custo de eletricidade de uma casa inteligente, também com uma abordagem baseada em MILP. É considerada a programação de otimização de eletrodomésticos e uma estratégia RD. Com base no desenvolvimento de inteligência artificial e tecnologia de comunicação, considera-se a utilização de RED do lado do usuário de acordo com os hábitos diários da casa.
- Koltsaklis et al. (2019) também desenvolvem uma abordagem baseada em MILP para a programação do consumo de energia de uma residência inteligente. Com o modelo desenvolvido é possível determinar a programação energética diária com ótimo custo-benefício para todos os tipos de cargas, que podem ser inflexíveis ou podem participar de programas de resposta à demanda. Estão previstos programas de carga/descarga de

veículos elétricos e armazenamento de energia, além da interação com a rede elétrica, comprando e/ou vendendo energia elétrica.

- Li et al. (2021) propõem um modelo de otimização de energia residencial considerando RD baseado em preço e em incentivos. Para ativar vários recursos flexíveis no lado do usuário para participar da RD, primeiramente foi estabelecido um modelo de carga misto. Posteriormente, visando incentivar os usuários a participar da minimização da curva de consumo diário de energia, é criado um modelo de agendamento para o dia seguinte, a fim de reduzir os custos de eletricidade doméstica e as flutuações de energia de carga doméstica como metas de otimização.
- Luo et al. (2020) apresentaram um novo sistema de gestão de energia doméstica, que gerencia de forma otimizada os recursos energéticos domésticos para o usuário em um ambiente dinâmico, para minimizar o consumo de custo de eletricidade de um dia de uma casa. Foi proposta uma estratégia heurística que considera o impacto da Tarifa de cobrança de demanda - TCD (*Demand Charge Tariff*) na operação residencial de um dia. O HEMS proposto modela as dependências operacionais dos dispositivos relacionados ao estilo de vida do usuário como um conjunto de restrições e, portanto, é capaz de fornecer melhor suporte à decisão do usuário.
- Tutkun et al., (2021) desenvolvem um HEMS com o intuito de resolver o problema de minimização do custo de eletricidade total diária e a PAR, otimizando os horários de início dos eletrodomésticos inteligentes controláveis, com base na tarifa de eletricidade em tempo real de hora em hora. Um processo Evolution é proposto como estratégia de solução, a partir da representação em uma cadeia binária que passa por operações de cruzamento e mutação durante o processo genético. Operadores especializados foram empregados para representarem eletrodomésticos inteligentes interruptivos e ininterruptos. No problema considerado, armazenador de energia e gerador fotovoltaico são também incluídos.
- Alilou, Tousi & Shayeghi (2021) apresentam um método de gerenciamento da demanda aplicado à residências inteligentes de uma rede inteligente: ela está estruturada com algumas casas inteligentes que possuem aparelhos controláveis, veículos elétricos e unidades de geração distribuída renovável, como turbinas eólicas. O modelo de incerteza de turbinas eólicas e os veículos elétricos também são considerados no método proposto para gerenciamento de energia, a tarifa de precificação em tempo real é utilizada para aplicação do programa de resposta à demanda. O custo de eletricidade

dos consumidores e a taxa de demanda de PAR são formulados para alcançar a melhor programação para o consumo dos dispositivos das casas inteligentes.

- Ur Rehman Yaqoob & Adil Khan (2022) propõem um método holístico para otimizar o uso de diferentes eletrodomésticos de acordo com as preferências dos prosumidores e cronograma definido, com o emprego de uma estrutura de gerenciamento de energia doméstica (*home power management framework* - HPMF) também baseada em MILP, que integra e otimiza de forma inteligente a operação de recursos renováveis, unidades de armazenamento de energia (*energy storage units* – ESU) e EV. Para aumentar sua duração de vida do sistema de armazenamento de energia, um método de controle de carga/descarga é particularmente proposto, envolvendo uma estratégia de precificação em tempo real para controlar a quantidade de energia necessária durante a execução de carga ou descarga. Para isso, as residências foram classificadas em domésticos em três categorias diferentes e cada categoria foi modelada de acordo com suas especificações técnicas e natureza de uso para garantir a satisfação do consumidor.
- Zamanloo et al. (2021) propõem uma programação de otimização de dois níveis baseada em PLIM para gerenciar e programar diferentes cargas residenciais, EVs, ESSs e REDs. Os eletrodomésticos foram modelados como cargas interrompíveis, ininterruptas e controladas por termostato. No primeiro nível de otimização, para minimizar o custo da eletricidade, o tempo de operação dos componentes da casa inteligente é determinado pelo HEMS inteligente e a energia ativa é trocada entre os equipamentos; já no segundo nível é considerado o custo ótimo obtido no primeiro nível e além da potência ativa, a potência reativa requerida pelas cargas também é fornecida utilizando a capacidade adicional dos inversores, dos VEs e SAEs que melhora o fator de potência da casa no ponto de ligação à rede.
- Hou et al. (2019) também um modelo holístico para centralizar a preferência dos usuários ao programar os equipamentos físicos envolvidos de diferentes naturezas. Para isso, foi feita a classificação e modelagem dos eletrodomésticos considerando suas características físicas, bem como as restrições satisfatórias dos usuários. Uma estrutura baseada em PLIM é proposta para programar inteligentemente a operação de eletrodomésticos, RES, ESS, PEV para um custo mínimo de eletricidade com garantia de satisfação do usuário. Para aproveitar melhor o SAE e o Veículo elétrico plug-in (*Plug-in electric vehicle* - PEV) e prolongar a vida útil das baterias, uma estratégia especificamente projetada para carregar e descarregar e período de tempo de acordo

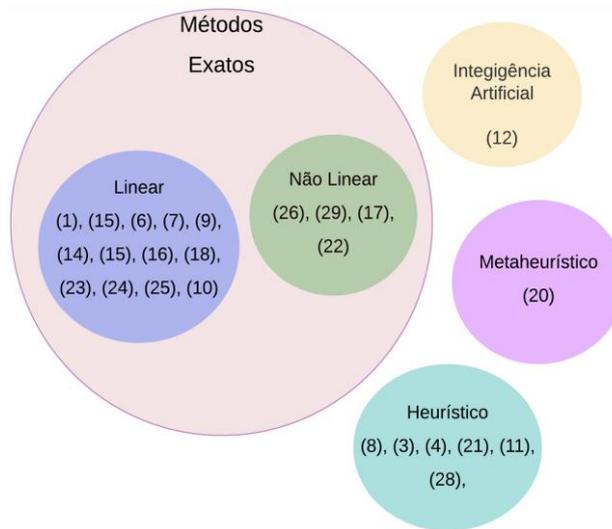
com o preço de tempo real e excedente de energia foram integrados ao problema de agendamento, o que permite um plano de negociação ideal entre casa e concessionária.

- Devido aos desafios associados ao fornecimento intermitente de energia renovável e visando minimizar o custo da concessionária de energia elétrica, ao mesmo tempo em que satisfaz a demanda de energia doméstica e os requisitos de carregamento de PEV, Wu *et al.* (2018) propõe uma estrutura de programação dinâmica estocástica para o melhor gerenciamento de energia de uma casa inteligente com armazenamento e PEV. Assumindo os modos VEs V2G (*vehicle-to-grid*), VEs V2H (*vehicle-to-home*) e VEs G2H (*grid-to-home*), o desempenho do sistema para estes modos é comparado com base no preço da eletricidade variável no tempo e na demanda de energia doméstica variável no tempo, para dias de semana típicos.
- Uma nova estrutura de sistema e algoritmo de controle que pode usar tanto o armazenamento da bateria quanto o gerenciamento da temperatura dos aparelhos térmicos é proposta por Shakeri *et al.* (2017). O algoritmo proposto recebe as informações de preço da concessionária antecipadamente e compra a energia elétrica fora do horário de pico e utiliza a bateria, além de gerenciar a temperatura dos aparelhos térmicos durante o horário de pico. O algoritmo também define uma estratégia de RD para garantir o equilíbrio entre a energia demandada pelos aparelhos elétricos e a energia comprada, gerada ou armazenada no sistema proposto.
- Zheng *et al.* (2018) apresentam uma nova estratégia de controle de carga e descarregar de baterias em um sistema de distribuição para otimizar o custo de transação de energia. É desenvolvido um modelo prático de operação de sistema de armazenamento de energia por bateria BESS de dois níveis para as concessionárias de distribuição de energia – CDE (*Distribution Companies*) considerando incertezas de previsão na operação do dia anterior e mitigando a lacuna de demanda líquida na operação em tempo real, para reduzir o custo de energia e o risco de transação. Para quantificar a mitigação de riscos e lucros, foram comparadas as estratégias de compra para demanda incerta e certa que ocorrem no dia seguinte.
- No trabalho de Yang & Wang (2021) foi desenvolvido um novo método distribuído para o sistema de energia transitiva residencial que permite que vários usuários consigam otimizar de maneira interativa a gestão de energia de sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (*Heating, Ventilating, and Air-Conditioning - HVAC*), além disso, uma bateria atrás do medidor é instalada na casa para armazenar a energia

elétrica extra para uso futuro. O medidor inteligente é um dispositivo que usa a internet das coisas para executar algoritmos de agendamento e coordenar os dispositivos acima.

A Figura 4 mostra um mapa conceitual que descreve, de maneira resumida, as diferenças entre as abordagens utilizadas nos artigos selecionados neste mapeamento sistemático. Verifica-se que, dentre os métodos exatos, a maioria dos autores utilizaram PL ou PLIM; depois, há uma representatividade de métodos heurísticos e metaheurísticas aplicados nas abordagens contempladas no referido mapeamento.

Figura 4 – Mapa conceitual das abordagens utilizadas nos estudos.



Fonte: Autora (2023).

GQ2: Quais são as formas de integração dos recursos energéticos distribuídos e flexíveis com a rede elétrica, no conceito de redes inteligentes?

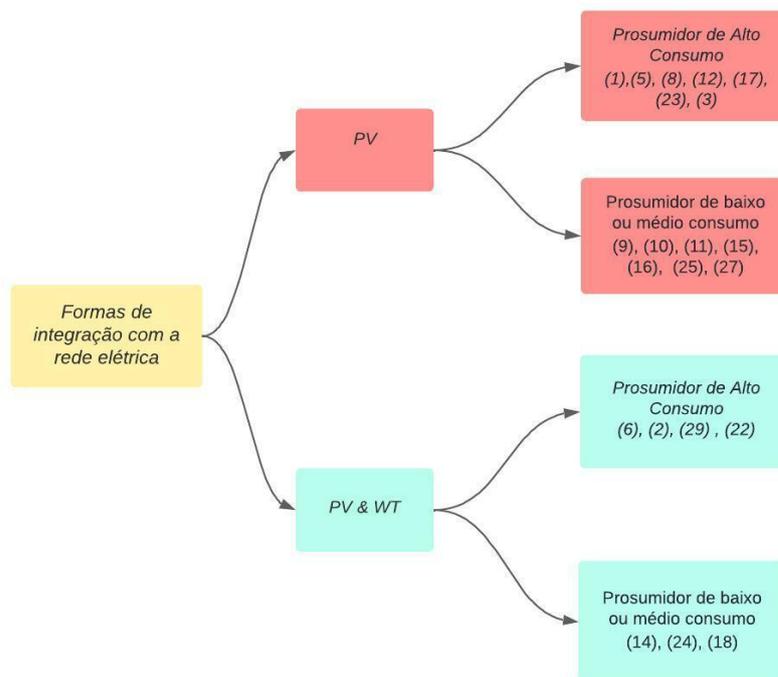
A fim de não tornar repetitiva a elucidação desta questão, em função de que as formas de integração dos recursos energéticos com a rede elétrica seguem caminhos metodológicos muito similares, as formas de integração denotadas são resumidas a seguir:

- Azami, Alizadeh & Abapour (2021) integram PV, ESS, VE e todos os tipos de aparelhos não deslocáveis, deslocáveis e incontroláveis em um programa de RD em um contexto de grande escala para resolver os problemas de otimização de demanda de edifícios residenciais a partir de perspectivas de usuário final e utilidade.
- Amer et al. (2021) realizam as operações de forma direta, com a integração e envolvendo a energia renovável (solar e eólica), sistemas de armazenamento de baterias e veículos elétricos em edifícios residenciais.

- Sangswang & Konghirun (2020) realizam a integração por meio de algoritmos de controle, que são implementados experimentalmente na plataforma de hardware criada de VE e baterias domésticas, energia solar e conversores eletrônicos de potência associados. As tecnologias de carregamento AC e DC para VEs estão incluídas. O HEMS otimiza simultaneamente o agendamento de carregamento e descarregamento de VEs e bateria doméstica.
- No trabalho de Javadi et al. (2020), é assumido um padrão de prosumidor típico com um painel fotovoltaico instalado para minimizar as flutuações resultantes no perfil de carga. Esse sistema faz com que os consumidores tenham arbitragem de energia e transacionem energia com a rede elétrica.
- O sistema de energia inteligente para uma casa inteligente proposto por Pal & Kumar (2018) inclui instalações geradoras de energia renovável, nomeadamente uma turbina eólica e um painel fotovoltaico, que produzem energia elétrica que pode ser consumida para as suas próprias necessidades, utilizada para requisitos de carregamento (armazenamento, veículos elétricos) ou vendida de volta à para a rede de distribuição.
- Na estrutura de gerenciamento de energia para uma residência inteligente fornecida por Erdinc et al. (2015a, b), é assumido um sistema distribuído de geração de energia renovável (PV) em pequena escala, com um veículo elétrico capaz de operar no modo V2H, em conjunto com um ESS.
- A estrutura proposta por Lu, Zhang & Lü (2020) integra de forma inteligente a infraestrutura de medição avançada de recursos renováveis, HPMF, ESU, VE e todos os eletrodomésticos essenciais.
- Um sistema de armazenamento de energia para uma residência, ou seja, uma bateria para armazenamento de eletricidade é considerada junto com um VE, oferecendo a opção de interação com a rede elétrica, comprando e/ou vendendo eletricidade. Além disso, um painel fotovoltaico junto com uma turbina eólica também é instalado, permitindo ao proprietário da residência realizar trocas adicionais de energia com a rede elétrica principal (KOLTSAKLIS et al., 2019).

As principais técnicas de integração entre dos recursos energéticos distribuídos e flexíveis com a rede elétrica estão apresentadas, de maneira concisa, na Figura 5.

Figura 5 – Mapa Conceitual das principais técnicas de integração utilizadas nos estudos.



Fonte: Autora (2023).

SQ1: Quanto ao gerenciamento de recursos energéticos distribuídos e flexíveis em residências, quais são as abordagens utilizadas?

Verificou-se, com a realização do mapeamento, que muitos artigos utilizavam formas semelhantes de realizar o gerenciamento de recursos energéticos distribuídos em residências, as quais são resumidas a seguir:

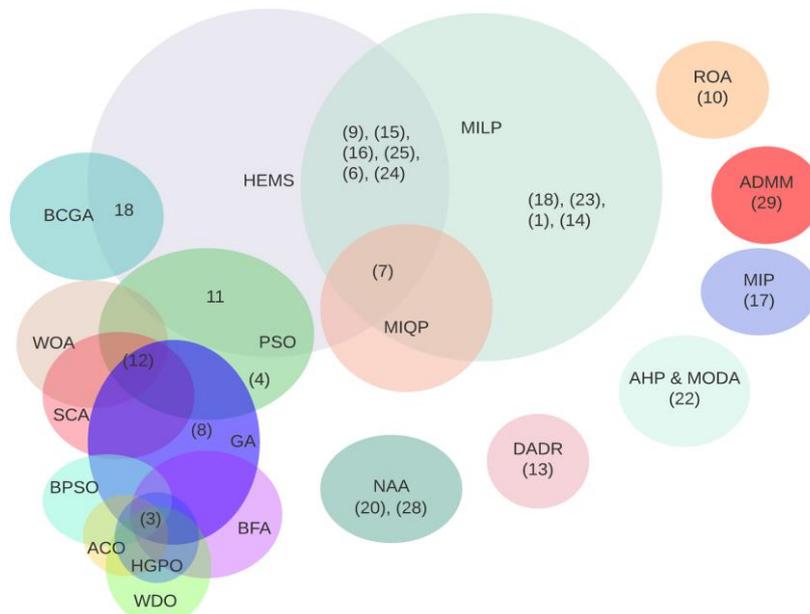
- Koltsaklis et al. (2019) apresentam um modelo de PLIM para a programação ótima de geração (alocação de produção) e gerenciamento de energia (alocação de demanda) de uma residência inteligente composta por diferentes tipos de aparelhos, incluindo RES, ESS, VE. Realiza interações com a malha energética, podendo comprar e/ou vender energia elétrica.
- Yang & Wang (2021) realizam o gerenciamento através método de gerenciamento de HVAC que melhora a eficiência energética de casas inteligentes, com BESS e energia transitiva. Foi projetado um algoritmo de otimização distribuída baseado no método de multiplicadores de direção alternada (*Alternating Direction Multipliers Method - ADMM*) para otimizar o uso de energia dos usuários, bem como facilitar o comércio de energia *Peer-to-Peer*.

- Javadi et al. (2020) propõem um HEMS para o auto escalonamento de ativos de usuários residência finais, empregando uma abordagem estocástica de MILP para determinar a melhor programação de consumo dos eletrodomésticos ao longo do dia.
- No trabalho de Celik et al. (2018) é proposto um algoritmo genético (*Genetic Algorithm* – GA) para o gerenciamento de energia para o dia seguinte, a fim de coordenar as fontes de energia renováveis e sistemas de armazenamento de energia de casas inteligentes com uma vizinhança determinada.
- Uma abordagem de otimização robusta e flexível foi empregada por Akbari-Dibavar et al. (2020) para o agendamento ótimo de gerenciamento de energia para uma casa inteligente autônoma.
- Imran et al. (2020) utilizam uma combinação de técnicas heurísticas que são: *hybrid genetic particle swarm optimization (HGPO)* proposto e outros algoritmos existentes, GA, *Binary Particle Swarm Optimization (BPSO)*, *Ant Colony Optimization (ACO)*, *Wind-Driven Optimization (WDO)*, *Bacterial Foraging Algorithm (BFA)*, para gerenciar o consumo de energia em edifícios residências realizando o agendamento de aparelhos inteligentes de forma otimizada.
- Um algoritmo *Particle Swarm Optimization* (PSO) de reparo baseado em gradiente foi proposto por Huang, Tian & Wang (2015), para alcançar soluções quase ótimas com custo computacional bastante reduzido em comparação com os outros algoritmos heurísticos propostos.
- No artigo de Mak & Choi (2020), o HEMS é utilizado para programar operações ótimas de eletrodomésticos e recursos de energia distribuídos. O problema é formulado com base em programação quadrática inteira mista (*Mixed Integer Quadratic Programming* - MIQP) e MILP.
- No estudo de Alilou, Tousi & Shayeghi (2021) são utilizados o *Multiobjective Dragonfly Algorithm* (MODA) e o *Analytical Hierarchy Process* (AHP) para otimizar as funções objetivas e encontrar a melhor programação de dispositivos.
- O problema de otimização considerado por Tutkun et al. (2021) foi resolvido para os tempos de início ideais dos aparelhos móveis no HEMS usando a abordagem de algoritmo genético codificado por binário (*Binary-Coded Genetic Algorithms* – BCGA).
- O modelo de gerenciamento de energia doméstica fornecido por Luo et al. (2020) é resolvido pelo (*Natural Aggregation Algorithm* - NAA).

- No artigo de Tantawy, Amer & M.Fayez (2022), os algoritmos de otimização: Algoritmo Genético (GA), PSO, Whale Optimization Algorithm (WOA) e Sine Cosine Algorithm (SCA) são usados para determinar a melhor programação do consumo de eletrodomésticos para um SH.
- A redução da carga de pico no RI foi abordada por Jindal, Singh & Kumar (2018), com um esquema de gerenciamento de RD analítico com base nos dados coletados dos SHs. São considerados vários fatores que auxiliam na tomada de decisões de resposta à demanda.
- Lu, Zhang & Lü (2020) propõem um modelo HEMS que realizada a otimização mono-objetivo e multi-objetivo: e minimizar o pico de carga e minimiza o custo de eletricidade de uma casa inteligente. Para melhor incorporar os DERs, os dados de radiação solar de um dia de verão em Xangai são usados para comparar as diferentes capacidades do sistema de armazenamento de energia fotovoltaica. Devido à natureza inerente das variáveis de decisão assumidas, o modelo empregado é essencialmente um MIP para o agendamento ótimo de aparelhos.

Foram utilizadas diferentes maneiras de realizar gerenciamento dos recursos energéticos em casas inteligentes. Para favorecer a compreensão, a Figura 6 apresenta um mapa conceitual contendo a forma que foram abordadas pelos autores em seus estudos.

Figura 6 – Mapa conceitual do gerenciamento dos recursos energéticos em *smart homes*.



Fonte: Autora (2023).

SQ2: Como são tratadas as condições estocásticas no gerenciamento de recursos energéticos distribuídos e flexíveis em residências?

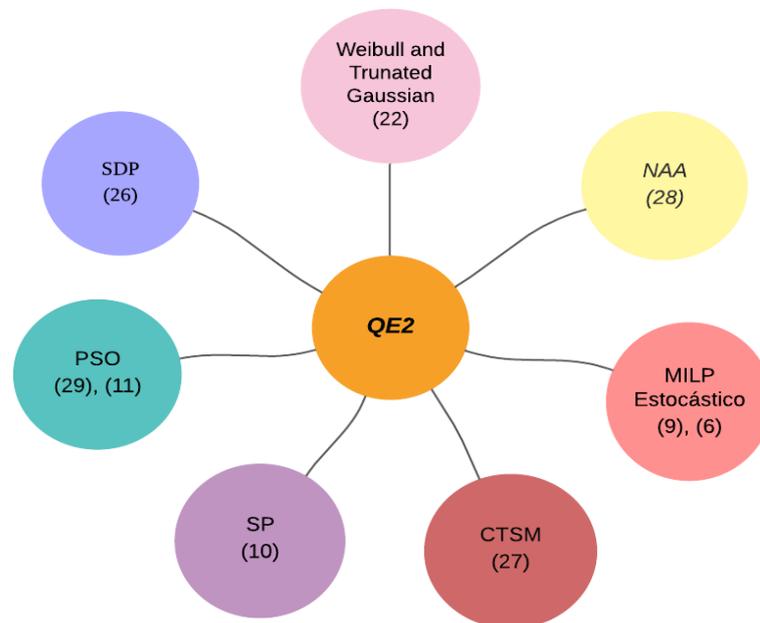
Foi possível verificar, durante a realização deste mapeamento, que as condições estocásticas não são abordadas em todos os estudos selecionados e que as abordagens existentes apresentam significativas semelhanças. A seguir são resumidas as abordagens que seguem esta linha metodológica e a Figura 7 fornece um mapa conceitual com um resumo das respectivas características.

- Na pesquisa de Javadi et al. (2020) realizam o auto-agendamento com uma abordagem estocástica de MILP, para determinar a programação do consumo dos eletrodomésticos ao longo do dia, obtendo a solução ótima global com uma taxa de convergência rápida.
- Akbari-Dibavar et al. (2020) empregam a otimização robusta e flexível que considera o mercado de energia em tempo real e leva em conta as incertezas associadas usando programação estocástica (*Stochastic Program- SP*), em que os foram usados casos para modelar as características incertas da geração fotovoltaica e os preços da energia.
- Huang, Tian & Wang (2015) utilizam PSO para resolver o problema não linear discreto misto de um programa de RD que controla vários aparelhos elétricos. O método de reparo de gradiente é aplicado para lidar com restrições que podem acelerar o PSO e garantir a execução em tempo real.
- Alilou, Tousi & Shayeghi (2021) tratam as condições estocásticas realizando a aplicação de um modelo estocástico para WT e VE. A potência horária produzida de WT e State-of-charge (SOC) inicial, hora de partida e hora de chegada de VEs são os parâmetros estocásticos do método de gerenciamento de energia residencial proposto que são modelados usando Weibull e funções de distribuição probabilística gaussiana truncada e de Weibull.
- Wu *et al.* (2018) utilizaram uma abordagem de programação dinâmica estocástica (*stochastic dynamic programming -SDP*) para resolver o problema de gerenciamento de energia ideal do veículo elétrico *plug-in* para microrrede da casa inteligente.
- Merdanoğlu et al. (2020) empregam uma metodologia de modelagem estocástica baseada em casos que incorpora incertezas em preços de energia elétrica em tempo real (vendas e compras), condições climáticas, produção de energia renovável, e comportamento do consumidor no uso de diferentes tipos de eletrodomésticos.
- Zheng et al. (2018) utilizam um novo algoritmo de evolução (NAA) para resolver o problema de controle de carga e descarga de baterias em um sistema de distribuição para

otimizar o custo de transação de energia. A NAA distribui indivíduos para várias subpopulações (chamadas de abrigos), e usa um modelo de migração estocástica para mitigar dinamicamente os indivíduos entre os abrigos.

- E, no trabalho de Shakeri et al. (2017) é realizada uma Modelagem Estocástica de Tempo Contínuo (*Continuous Time Stochastic Modeling - CTSM*) para realizar a estimação dos parâmetros do modelo térmico.

Figura 7 – Mapa conceitual dos tratamentos das condições estocásticas.



Fonte: Autora (2023).

SQ3: Quais são as ferramentas para análise de dados no gerenciamento de recursos energéticos distribuídos e flexíveis em residências?

As ferramentas que os autores utilizaram para realizar as análises de dados em seus estudos, selecionados neste mapeamento, serão apresentadas para responder a SQ3. E, para auxiliar na compreensão da quantidade de estudos que utilizaram as ferramentas, é apresentado na Figura 8 um mapa conceitual com os números dos artigos e a respectiva ferramenta que cada autor utiliza.

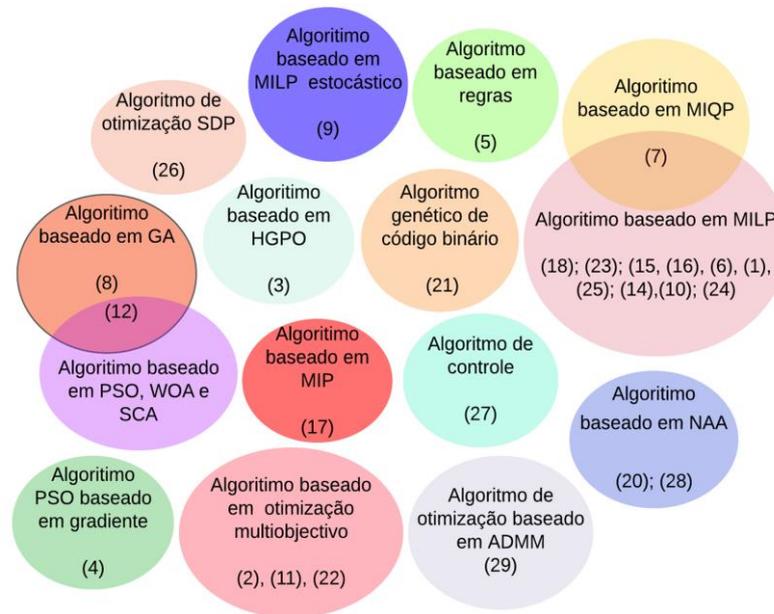
- Koltsaklis et al. (2019) apresentam um método baseado em PLIM para programar, de maneira otimizada, a geração (alocação da produção) e gerenciamento de energia (alocação de demanda) de uma residência inteligente. A abordagem foi testada em um estudo de caso ilustrativo de um dia de inverno com medições de hora em hora de uma residência inteligente. O problema foi resolvido usando o ILOG CPLEX incorporado

na ferramenta Sistema Geral de Modelagem Algébrica (*General Algebraic Modeling System - GAMS*).

- Ur Rehman, Yaqoob & Khan (2022) propõem um modelo HPMF baseado em MILP, que integra e otimiza a operação de recursos renováveis, o carregamento/descarregamento de UAE e EV.
- Javadi et al. (2020) também empregam PLIM, porém na variante estocástica, para realizar a autoprogramação HEMS e determinar o estado ótimo dos eletrodomésticos ao longo do dia.
- Sangswang & Konghirun (2020) empregam um algoritmo baseado em regras para o HEMS para vários modos de operação, incluindo minimização de custos, suporte autônomo e de rede.
- Amer *et al.* (2021) propõem um algoritmo de otimização multiobjectivo de RD para HEMS, tendo em vista a minimização de custo de consumo individual de eletricidade das residências e considerando o conforto e o estilo de vida dos usuários.
- Os algoritmos MIQP e PLIM foram utilizados por Mak & Choi (2020) para realizar a formulação dos problemas de otimização para o HEMS, agregador HEMS e VVO.
- Uma nova arquitetura de sistema e algoritmo de controle, que pode usar tanto o armazenamento da bateria quanto o gerenciamento da temperatura dos aparelhos térmicos é proposta por Shakeri *et al.* (2017), para realizar a resposta à demanda de eletricidade de qualquer casa inteligente. O algoritmo proposto recebe antecipadamente as informações de preço da concessionária e compra a energia elétrica fora do horário de pico e utiliza a bateria, além de gerenciar a temperatura dos aparelhos térmicos durante o horário de pico.
- Jindal, Singh & Kumar (2018) sugerem um esquema de gerenciamento de DADR do consumo dos usuários residentes das SHs para reduzir a carga de pico na rede. Dois algoritmos são propostos para a RD: o primeiro é chamado de centrado no consumidor - DADR (*consumer centric* (CC – DADR); o segundo é nomeado como centrado no utilitário - DADR (*utility centric* (UC – DADR)).
- Huang, Tian & Wang (2015) abordam um programa de RD para otimizar a programação de operação de eletrodomésticos. Para alcançar as soluções ótimas do programa DR, foi proposto um algoritmo PSO baseado em gradiente.

- Imran et al. (2020) utilizam um algoritmo heurístico de otimização baseado em HGPO, que é uma combinação entre BPSO e GA, para gerenciar a otimização de energia em geração híbrida e programas de RD baseados em preço.
- Zamanloo et al. (2021) propõem um algoritmo de otimização de dois níveis modelado baseada em PLIM para o gerenciamento de energia de eletrodomésticos dentro de uma casa inteligente gerenciando e programando diferentes cargas residenciais, EVs, ESSs e DERs.
- O estudo realizado de Yang & Wang (2021) considera um algoritmo de otimização baseado em ADMM para realizar a operação automática do sistema HVAC e a das baterias, minimizando os custos de energia dos usuários.
- Luo *et al.* (2020) propõem um modelo HEMS que faz a consideração da penetração tanto da precificação em tempo real quanto da tarifa de cobrança de demanda. Para resolver esse modelo é usado o NAA: um algoritmo inspirado em inteligência biológica que imita os comportamentos de auto agregação de animais que vivem em grupo.
- O problema de otimização realizado por Tutkun *et al.* (2021) foi resolvido para os tempos de início ótimos dos aparelhos deslocáveis no sistema de gerenciamento de energia doméstica usando a abordagem de algoritmo genético de código binário.
- Lu, Zhang & Lü (2020) consideram um modelo HEMs que minimiza o pico de carga e o custo de uma casa inteligente, a partir de um modelo MIP implementado no ambiente do MATLAB.
- Tantawy, Amer & M.Fayez, (2022) propõem um HEMS no qual dois sistemas foram simulados e estudados com quatro algoritmos de otimização GA, PSO, WOA e SCA, para realizarem o agendamento ótimo de aparelhos para residências.
- Wu *et al.* (2018) formularam um algoritmo de otimização SDP para gerenciar a energia em uma casa inteligente, otimizando a alocação de energia elétrica entre bateria e PEV, a demanda de energia e a rede elétrica.

Figura 8 – Mapa conceitual das ferramentas para análise de dados nos estudos.



Fonte: Autora (2023).

SQ4: Quais as discretizações adotadas no gerenciamento de recursos energéticos distribuídos e flexíveis em residências?

Quanto às formas de discretização que são utilizadas nos estudos deste mapeamento, se verificou que na maioria dos estudos foram utilizados um horizonte de 24 horas, em que o gerenciamento era feito a cada 1 hora. Algumas das abordagens adotadas pelos estudos serão denotadas a seguir e a Figura 9 apresenta um mapa conceitual dessas formas adotadas.

Azami, Alizadeh & Abapour (2021) apresentam o problema de gestão de energia formulado como um PLIM ao longo do horizonte 24 horas, a faixa horária é considerada a cada uma hora, assim cada dia serão 24 faixas horárias. De maneira semelhante, Tutkun *et al.* (2021) realizam uma simulação para realizar a minimização dos custos diários de energia com base nos preços da eletricidade, em que o dia é dividido em 24 faixas de tempo iguais, a primeira faixa de tempo do dia indica o intervalo 00h00 - 01h00, a segunda faixa de tempo mostra o intervalo 01h00 - 02h00, e assim por diante.

Em Li *et al.* (2021), os aparelhos considerados no sistema da casa inteligente possuem o período de agendamento das 0:00 às 24:00 horas, em que um dia é dividido em 48 intervalos de tempo $\Delta t = 0,5$ h, ou seja, em intervalos de tempo de 30 minutos.

Para serem realizadas as experiências numéricas, Merdanoğlu *et al.* (2020) assumem um horizonte de decisão de programação de 2 dias que consiste em períodos de 15 minutos. Logo, o horizonte de planejamento é de 192 períodos. Além de que, os períodos de início de

trabalho para aparelhos controláveis e incontroláveis são determinados de maneira aleatória, de modo que cada tarefa seja concluída sem interrupção e dentro da sua janela de tempo correspondente.

Tantawy, Amer & M.Fayez (2022) desenvolvem um sistema proposto todo consumidor está preparado com EMC que está preparado para agendar vários aparelhos, e para fins de simulação, o número de aparelhos neste sistema será de 14 aparelhos, e eles estarão funcionando em vários intervalos de tempo. As 24 horas são distribuídas em 96 faixas horárias por dia, 15 minutos. Para testar o desempenho do modelo proposto, utilizamos um horizonte de tempo de 24 h de dia inteiro, enquanto a granularidade de tempo utilizada é de quinze minutos. Ur Rehman, Yaqoob & Khan (2022).

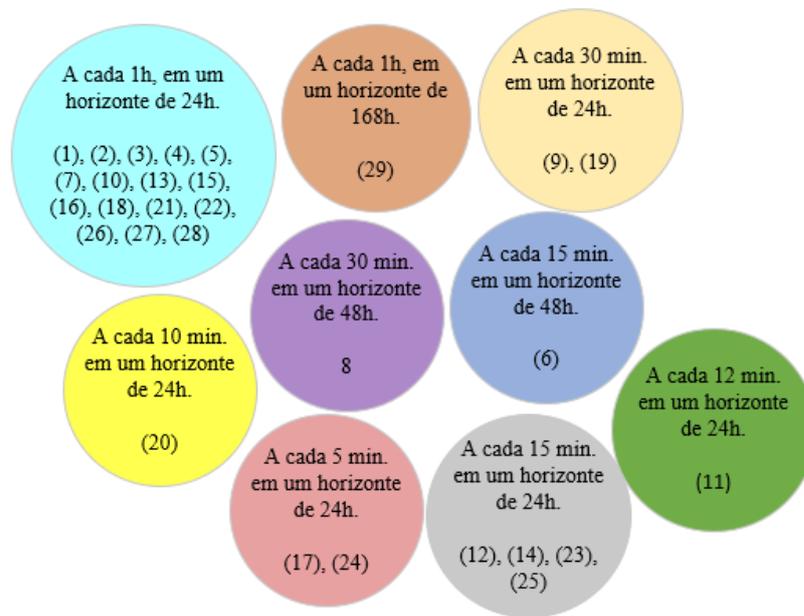
No estudo apresentado por Zhang *et al.* (2015) a discretização adotada foi de um horizonte de agendamento de 24 horas que é dividido igualmente em 120 faixas horárias, sendo cada faixa horária de 12 minutos. Enquanto que no trabalho apresentado por Luo *et al.* (2020) foi adotado que seria um típico dia de verão e que o horizonte de agendamento tem início a partir das 7h, quando o usuário inicia eu dia, e termina às 7h do dia seguinte. O intervalo de agendamento é definido como sendo a cada 10 minutos, totalizando 144 intervalos de tempo de agendamento.

No trabalho de Lu, Zhang & Lü (2020), foi adotado o intervalo de tempo dos eletrodomésticos das 6h às 6h do dia seguinte. Em que se tem um horizonte de 24h00 divididas em 288 horários, ou seja, a cada 5 minutos. O que os autores denotam que seja pequeno o suficiente para aumentar a flexibilidade do agendamento do dispositivo.

Para verificar a eficiência do modelo proposto é utilizado um exemplo de simulação, em que o planejamento é feito ao longo de um dia (24h00), e que tem o horizonte de agendamento começa às 7h, continua até as 7h do dia seguinte e é dividido em 288 intervalos de 5 minutos (ZAMANLOO *et al.*, 2021).

Em Yang & Wang (2021) é solucionada uma programação de energia para o dia seguinte, onde o algoritmo distribuído realiza a otimização da programação horária de energia dos usuários para o dia seguinte. Para isso, são feitas simulações por 7 dias continuamente, então o período de simulação é de 168 h.

Figura 9 – Mapa conceitual das formas de discretizações adotadas nos estudos.

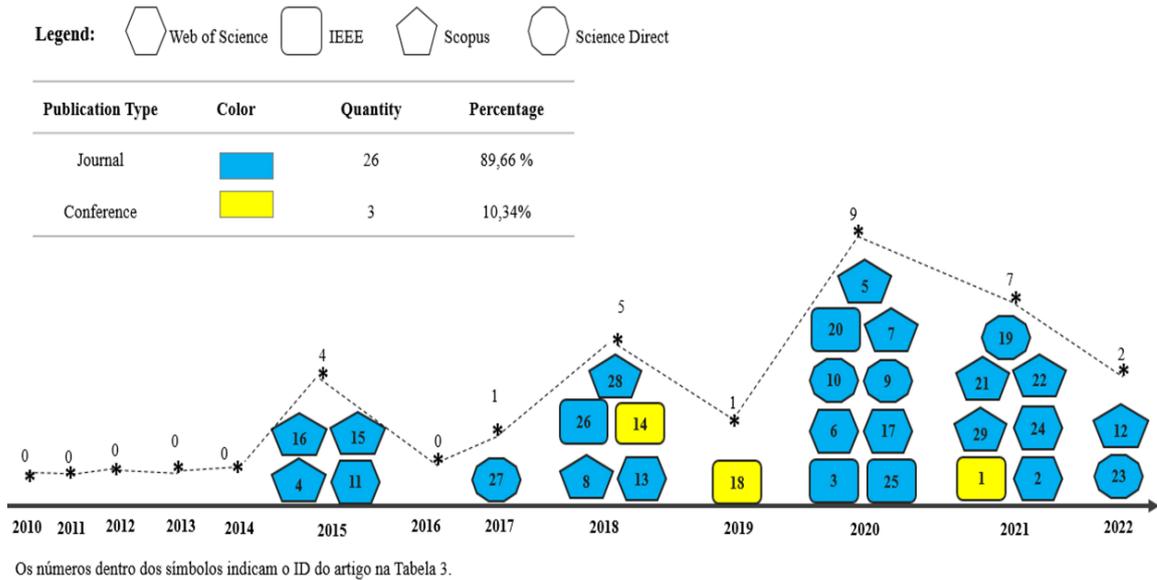


Fonte: Autora (2023).

QET1: Quais são os períodos que envolvem as GQ1-GQ2 e SQ1-SQ3?

O mapeamento sistemático aqui apresentado ocorreu em fevereiro de 2022, com a seleção dos artigos publicados a partir do ano de 2010 até fevereiro de 2022. Os artigos selecionados são apresentados na Figura 10, classificados por seu ano de publicação, a figura também conta com legenda do tipo de publicação e qual repositório digital devolveu o trabalho no período da pesquisa. Ao analisar a figura é possível verificar que, dentro dos artigos selecionados, há uma maior concentração no o período de 2018 a 2021, a realização de pesquisas com o foco em gerenciamento de recursos energéticos distribuídos no ambiente de *smart grid* e *smart home* é uma questão atual, e para reforçar que é uma questão dos dias atuais frisa-se que foram selecionados dois artigos do ano de 2022.

Figura 10 – Publicações por base de dados, data e tipo.



Fonte: Autora (2023).

3.1.4.2. Contribuições para o estudo

Dentre os 29 artigos escolhidos para a revisão da literatura composta pelos estudos selecionados pela realização deste mapeamento sistemático, 4 estudos foram retirados para serem utilizados como base principal para a criação do método e da modelagem do problema que será descrito neste trabalho.

Uma abordagem híbrida de otimização robusto-estocástica é utilizada por Akbari-Dibavare *et al.* (2020) para o gerenciamento de energia de uma casa inteligente, que é conectada ao sistema fotovoltaico e armazenamento de bateria. Este artigo visou a lucratividade da casa inteligente nos mercados DA e RT por meio do agendamento adequado do sistema fotovoltaico, cargas e unidade de armazenamento, ou seja, considerou as incertezas do preço da energia e da geração fotovoltaica e deixou de fora o conforto do usuário e as incertezas de carga dos aparelhos residenciais.

O estudo de Zamanloo *et al.* (2021) apresenta um algoritmo de otimização de dois níveis para ser aplicado para gerir os eletrodomésticos de uma casa inteligente, incluindo cargas interrompíveis, ininterruptas, controladas por termostato e não programáveis, bem como as estratégias de carga/descarga de VE e SAE na presença de recursos energéticos distribuídos. Porém, não foi considerado o emprego de BESS para a possibilidade realizar o carregamento de eletrodomésticos, e o efeito do envelhecimento da bateria e seus custos são ignorados, o que poderia permitir, ao usuário final, um olhar mais realista do sistema de gerenciamento e /ou a

utilização de um VE pode ser usado como uma forma relativamente barata de armazenar e transferir energia.

Um modelo HEMS para casas inteligentes que possui, fontes fotovoltaicas e unidades de armazenamento de bateria e programação de aparelhos, foi proposto por Tantawy, Amer & Fayed (2022) que levaram em consideração a classificação dos aparelhos em: aparelhos essenciais, aparelhos interrompidos e aparelhos ininterruptos, e fizeram uma classificação do usuário: usuário não ativo, usuário semi-ativo e usuário totalmente ativo. O estudo trata o conforto do usuário e a redução da conta de energia elétrica por meio da programação de aparelhos, de maneira diferente do que foi abordado pelos autores, esta dissertação utilizará o PLIM para realizar o modelo matemático para programar as cargas.

Ur Rehman, Yaqoob & Khan (2022) fornecem uma estrutura de gerenciamento de energia doméstica eficiente baseada em PLIM para várias residências, é proposto também um método de controle de carga/descarga das UAE e VE que usa uma estratégia de precificação em tempo real para controlar a quantidade de energia necessária durante a execução de carga ou descarga. Os dados essenciais sobre as condições ecológicas e climáticas utilizados são previstos pelas fontes locais. Mesmo sendo definido cronograma de uso dos eletrodomésticos, não foram utilizadas abordagens que visam as incertezas de dados desses aparelhos. E, mesmo sendo definido que seriam utilizados o UAE e o EV, não foi considerado o seu custo de capital para fazer a interação ao HPMF ou se utilizar sistemas de baterias.

Com realização deste Mapeamento Sistemático foi possível ter uma visão mais ampla a respeito do que está sendo abordados nos estudos com a temática do HEMS e SH no meio acadêmico. Dessa forma, é possível afirmar que esta dissertação se diferencia dos outros trabalhos pelo fato de que, a maioria dos estudos abordam somente um dos componentes apresentados neste estudo, em sua maioria eles abordam somente as cargas, ou sistema de armazenamento (que na maioria das vezes não é composto por um BESS) e ou utilizam o veículo elétrico como bateria ou como carga controlável e esta dissertação faz uso dele considerando como ambos dois, ou resposta à demanda, dentre outros. O maior diferencial desta dissertação é que ela visa minimizar os custos energéticos e maximizar o conforto do usuário e para isso ela faz uso do HEMS que possui tanto o BESS, o VE, os eletrodomésticos e faz uso o PLIM para otimizar alcançar os objetivos, além de que a casa tem um diferencial que é o inversor híbrido que faz essa comunicação do fluxo de energia entre todos os componentes do HEMS.

O diferencial desta dissertação é realizar um mapeamento sistemático da literatura para fazer um levantamento dos trabalhos que investigam quais abordagens são utilizadas para determinar o planejamento de operações de recursos energéticos distribuídos em residências inteligentes. Com a realização desse EMS, é possível afirmar que diferente dos outros trabalhos apresentados, esta dissertação aborda a utilização do HEMS sob a ótica do consumidor, por meio de uma abordagem baseada em PLIM a partir da concepção de gerenciamento da energia transacionada entre o consumo e a produção que considera a resposta à demanda. Tendo como foco a otimização dos custos referentes ao uso da eletricidade, como também, garantir o conforto do usuário por meio do uso garantido das cargas não controláveis no momento em que o usuário necessitar, assumindo que a residência seria penalizada caso essa restrição não fosse assegurada. Além disso, foi utilizado um sistema de armazenamento que é composto pelo BESS e VE para garantir que a residência tenha energia armazenada para suprir as necessidades do prosumer caso ela se encontre em estado de *off-grid*, para tanto serão desenvolvidos os seguintes itens como principais contribuições deste estudo são:

- Realizar o desenvolvimento de um HEMS que utiliza uma abordagem determinística para as etapas de planejamento do *Scheduling* considerando a TOU em sua realização e engloba a otimização por meio da MILP;
- Desenvolver um modelo de gerenciamento de energia residencial capaz de considerar a demanda energética das cargas residenciais, diferenciando por tipo de carga, e integrando um inversor híbrido que faz a comunicação entre todos os recursos flexíveis que a residência possui;
- Aplicar um modelo de otimização PLIM para obter uma minimização nos custos energéticos considerando o conforto dos usuários. Ressalta-se que, o aspecto de conforto é tratado como restrições, por meio de cargas não controláveis;
- Utilizar a capacidade de reserva diária do BESS e do VE para obter um recurso adicional de armazenamento de energia PV para o consumidor;
- Considerar restrições técnicas relacionadas à limitação da capacidade máxima de compra e venda de energia;
- Considerar restrições técnicas para a penalização do não atendimento das cargas residenciais.

4. METODOLOGIA

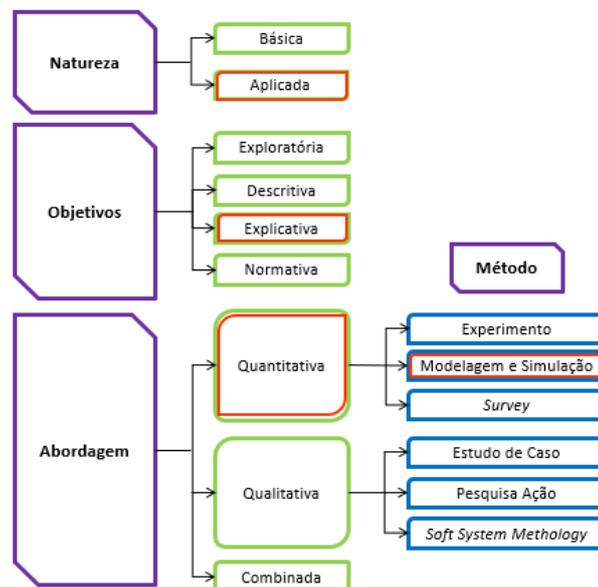
A pesquisa científica e seus métodos de análises são um conjunto de atividades sistemáticas e racionais que guiam a geração de conhecimentos válidos, indicando um caminho a ser seguido (LAKATOS; MARCONI, 2010). Tal abordagem consiste na utilização de estratégias e técnicas que devem ser observadas para a construção do conhecimento, com a finalidade de comprovar sua validade e utilidade nos diversos campos de ação da sociedade (PRODANOV; FREITAS, 2013). Este capítulo apresenta a metodologia que proposta para se atingir o objetivo geral e os específicos. É realizada a classificação da pesquisa quanto a sua natureza, a abordagem, os objetivos e o método de análise dos dados. Posteriormente é mostrado a estrutura da RD a arquitetura e modelagem matemática do HEMS.

4.1. CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Conforme Corbin & Strauss (1998), um grupo de técnicas e procedimentos que são utilizados para coletar e analisar os dados são conhecidos como o método de pesquisa. O método fornece maneiras para se alcançar o objetivo proposto, ou seja, são as “ferramentas” que se utilizam nas pesquisas, com a finalidade de responder à questão que está sendo estudada.

A classificação da pesquisa pode ser feita de acordo com sua natureza, objetivos, abordagem e método (HASEGAWA, 2016). Esta classificação está apresentada na Figura 11.

Figura 11 – Metodologia de pesquisa em Engenharia de Produção.



Fonte: Adaptado de Horta (2013).

A linha de pesquisa aplicada neste estudo pode ser caracterizada pelas classificações seguintes:

Quanto à natureza: é uma pesquisa aplicada uma vez que ao realizar a aplicação prática do modelo pode gerar soluções de problemas no objeto de estudo, que auxiliam na tomada de decisão dos problemas relacionados gerenciamento de recursos energéticos em residências.

Quanto ao objetivo: é uma pesquisa explicativa pois procura identificar fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência de fenômenos.

Quanto à abordagem: é uma pesquisa quantitativa, este tipo de abordagem é empregada quando o pesquisador captura as evidências de pesquisa através da mensuração das variáveis, como é realizado nesta dissertação.

Quanto ao método: é uma modelagem e simulação, pois é feita a modelagem do problema apresentado para analisar um problema real por meio da construção de um modelo matemático para o auxílio ao processo de tomada de decisão. A análise é realizada através de casos comparativos, para determinar se o sistema responderá a modificações que lhe são propostas.

Os dados de geração solar serão obtidos a partir de estimativas do Atlas Solar (ZAMANLOO et al., 2021), enquanto que os dados de equipamentos mais utilizados em cada momento, quais os equipamentos que são considerados controláveis e não controláveis, serão obtidos por meio da literatura existe em que se apresentou esses dados, pois assim é possível ter um embasamento teórico mais assertivo.

4.2. PROPOSTA DO ESQUEMA PARA RESPOSTA A DEMANDA

O programa de RD abordado neste trabalho visa solucionar o problema de *Scheduling* proposto para decidir sobre a operação ótima para atendimento das cargas residenciais. Os eletrodomésticos ou cargas serão divididos em dois grupos principais, baseados em suas características. O primeiro grupo se refere aos aparelhos controláveis (AC), que são aqueles em que seu uso pode ser de programado sem comprometer o nível de conforto do usuário, por exemplo: máquina de lavar, sistema de refrigeração HVAC (*Heating, Ventilation and Air Conditioning*), lava louças e a secadora.

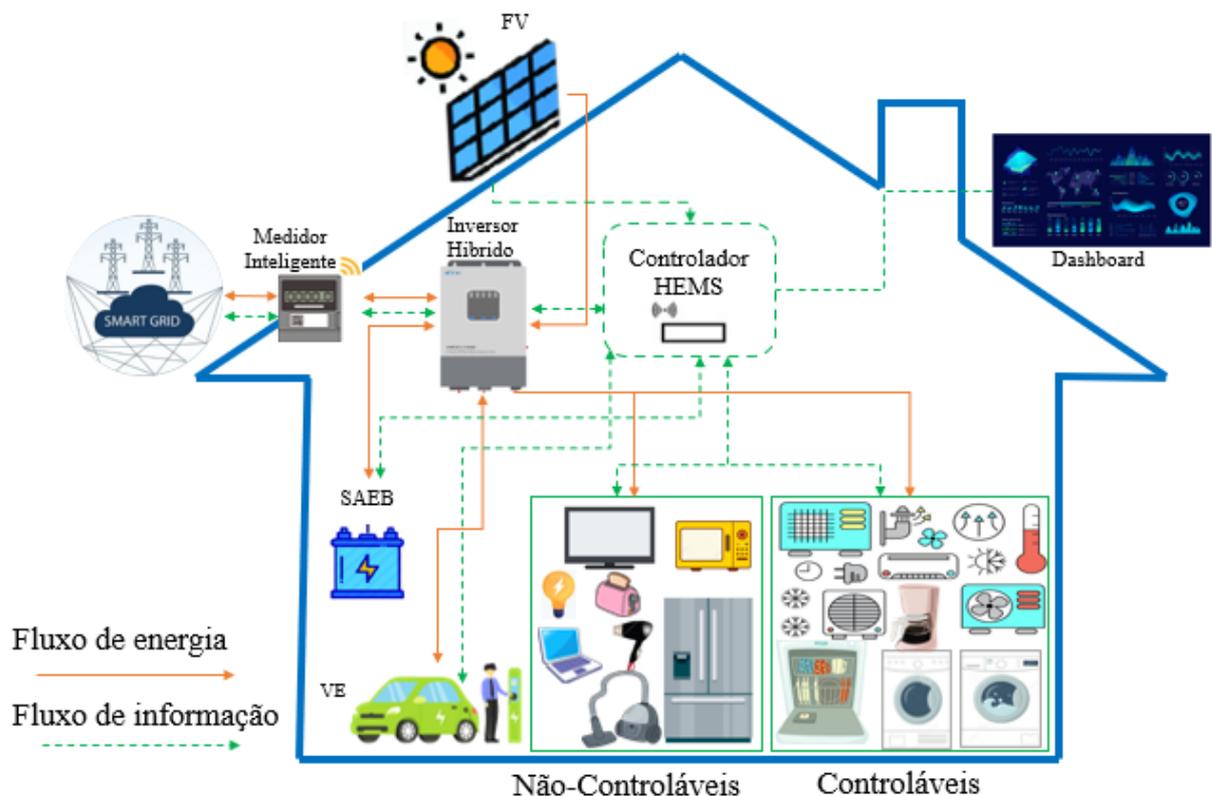
O segundo grupo é composto pelos aparelhos não controláveis (ANC) também são chamados de cargas críticas. Os ANC são aqueles que seu uso deve ser iniciado imediatamente quando os usuários necessitarem de seu serviço, como geladeira, televisão, sistema de

iluminação residencial, computador. Esses aparelhos não podem ser agendados ou otimizados e seu tempo de operação é imutável. Para este problema essas cargas não controláveis estarão sempre disponíveis, ou seja, estarão sempre ligadas e para garantir que isso ocorra existe uma restrição de penalização para não atendimento dessas cargas, pois o funcionamento dessas cargas deve ser sempre garantido, seja pela energia da rede, da bateria ou da geração de energia renovável pelos painéis solares.

4.3. ARQUITETURA DO HEMS

A Figura 12 ilustra a estrutura básica do HEMS proposto nesta dissertação. O HEMS possui: o programa RD, que é estruturado pelas cargas apresentadas anteriormente, sistema de energia (armazenamento, geração de energia PV e consumo de energia), sistemas tarifários de compra e venda.

Figura 12 – Estrutura ilustrativa da HEMS.



Fonte: Autora (2023).

O HEMS em conjunto com programa RD, que é a chave da estrutura proposta, será o responsável por programar o período de tempo ideal para o funcionamento dos

eletrodomésticos, bem como o tempo de carga e descarga do VE e do BESS. A SH terá um SM que é responsável por realizar o compartilhamento bidirecional de informação e de energia entre a empresa responsável pelo serviço de distribuição e o HEMS, o SM recebe as informações essenciais de consumo de energia dos eletrodomésticos e transmite essas informações para a distribuidora, como também, faz a transmissão de sinal de preço da eletricidade para o HEMS. Portanto, a operação de cada eletrodoméstico pode ser gerida e empregada para fazer o controle de cada um dos aparelhos um por um por meio do fluxo de informação entre o medidor inteligente e os eletrodomésticos. O *dashboard* é o responsável pela comunicação entre todos os elementos que compõe o HEMS. A SH terá a opção de comprar e/ou vender a energia gerada excedente para a concessionária.

O HEMS receberá todas as informações necessárias para seu funcionamento, como os dados de previsão do tempo, dados de recebimento de energia da concessionária e de geração energética por meio do uso do sistema FV. Frisa-se que o VE é uma carga especial, pois de maneira diferente das outras cargas, ele pode atuar tanto como uma carga que consome eletricidade quanto como, em alguns casos, fonte de armazenamento de eletricidade através do V2G. Nesta dissertação ele considerado dessas duas formas, ou seja, bem como o BESS o VE é utilizado como uma bateria para armazenar a energia elétrica. O HEMS também conta com um inversor híbrido que é responsável pelo gerenciamento da energia do sistema fotovoltaico, BESS, VE e a rede elétrica principal, sendo que esse inversor realiza o processo de carregamento tanto do BESS quanto do VE por meio da energia solar e/ou rede elétrica principal e realiza a transformação da energia de corrente alternada (CA) em corrente contínua (CC).

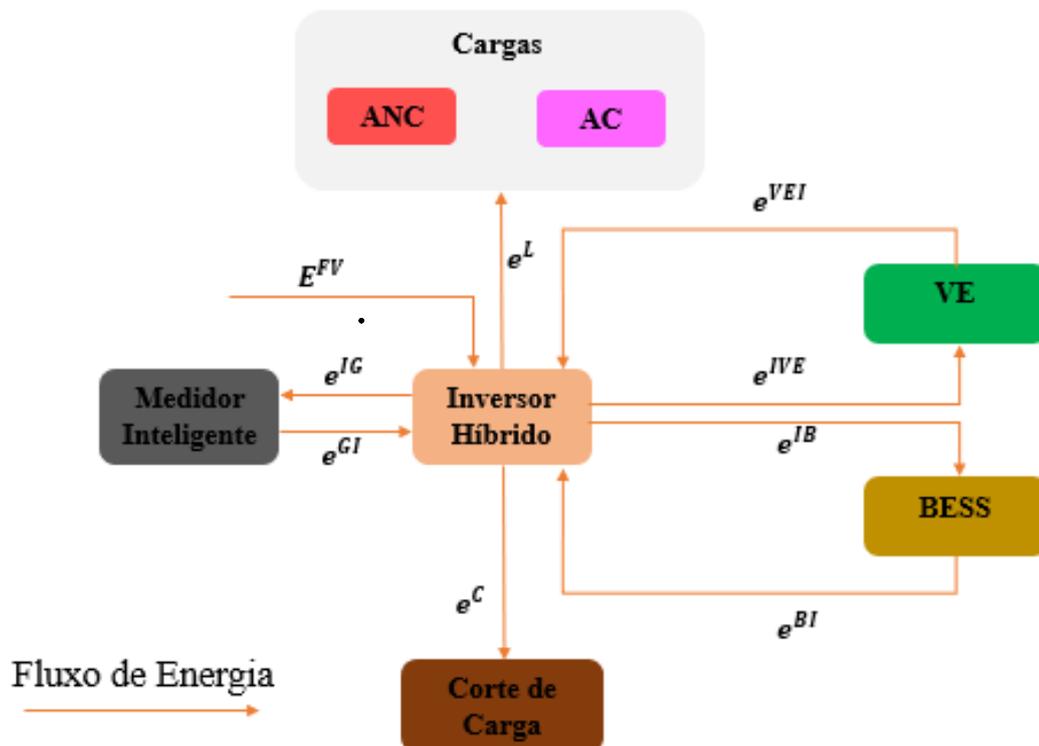
O inversor híbrido transforma energia elétrica em corrente alternada (CA) em corrente contínua (CC) e vice-versa. Permite converter a energia CC provinda do sistema fotovoltaico e do V2G em energia em CA para atender as cargas domésticas, bem como converter a energia CA em CC para o carregamento do BESS e do V2G. Além de que, realiza o processo de inversão da eletricidade CC armazenada em no sistema de armazenamento de bateria solar em eletricidade CA para ser usada na casa. O inversor híbrido realiza a conversão de energia bidirecional CC para CA, pois, o inversor híbrido pode converter eletricidade CC em CA para suprir a casa, e também pode receber eletricidade CA da rede e convertê-la em eletricidade CC que pode ser armazenada em baterias para uso posterior. Além disso, a energia solar pode flutuar à medida que os níveis de irradiação solar aumentam e diminuem, com base na hora do

dia e nos padrões climáticos e o inversor híbrido regula a potência da energia para garantir que todo o sistema funcione dentro dos parâmetros necessários (PALMETTO SOLAR, 2022).

Os esquemas de preços por tempo de uso (*Time Of Use* - TOU) faz parte do programa de RD. Conforme afirmado por Yu & Yu (2006), o TOU é um dos métodos importantes para realizar o gerenciamento do lado da demanda. Por meio do TOU, o controle de demanda responderá ao preço da energia e terá uma mudança na forma da curva de demanda, melhorando assim a condição de carga. De acordo com Aalami *et al.* (2008), normalmente o preço é menor no período de carga leve e tende a aumentar com o aumento da demanda. Em geral, o período de carga pesada (horário de ponta) coincide com os valores mais elevados de tarifa. Desse modo, a tarifa base que será utilizada no esquema de preços é a TOU que envolve um preço de tarifa para cada hora do dia, de modo a orientar os consumidores e os prossumidores no intervalo de 24 horas. Todos os eletrodomésticos são conectados ao HEMS através de um sinal de comunicação sem fio, cujas informações operacionais podem ser disponibilizadas em forma de *dashboard*.

Tendo como base a estrutura ilustrativa do HEMS, foi desenvolvido o modelo conceitual do circuito elétrico relacionado ao HEMS exibido na Figura 13.

Figura 13 – Modelo conceitual do circuito elétrico relacionado ao HEMS.



Fonte: Autora (2023).

4.4. DEFINIÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO DO HEMS

Esta dissertação busca desenvolver uma abordagem baseada em PLIM para o problema de decisão associado ao HEMS que considera a geração, o armazenamento e o consumo de energia elétrica, envolvendo o uso de veículos elétricos V2G e mecanismos de controle de demanda. E para alcançar esse objetivo esta subseção, apresentará as condições que serão empregadas nesta dissertação para realizar a modelagem da função objetiva juntamente com as restrições referentes a programação dos aparelhos, que são divididos conforme apresentado na RD, tendo como base o modelo HEMS mencionado na Figura 12.

Como foi definido na subseção 3.2 os aparelhos são divididos em não controláveis e controláveis. Os eletrodomésticos não controláveis funcionam de duas formas liga e desliga ou alimenta e não alimenta e seu tempo de operação é imutável, sendo assim não é possível realizar o agendamento ou otimização dessas cargas, pois não é possível reduzir, interromper ou mover os eletrodomésticos não controláveis e eles precisam ter seu funcionamento atendido pelo HEMS a qualquer momento que seu uso for necessário pelo prosumidor, dessa forma essa carga não contribui de maneira direta no gerenciamento de energia da residência. Considera-se que a casa está conectada à rede de distribuição de energia elétrica e por isso as cargas não controláveis estarão sempre ligadas. Para assegurar que a alimentação dessas cargas será atendida será criada uma restrição que garante esse funcionamento que pode ser da rede principal, da bateria ou sistema solar.

As formas de funcionamento das cargas controláveis que serão abordadas neste trabalho são: o funcionamento pode ser interrompido e retornado em outro momento, o horário de funcionamento pode ser deslocado para outro horário que preferencialmente não esteja no período de pico de energia, ou seja, no horário em que o custo para obter a eletricidade seja menor, pois, o fato de parar ou mover o funcionamento dessas cargas controláveis para outro momento não afeta a eficiência do uso dessas cargas.

Além dos eletrodomésticos a SH também estará equipada com um sistema FV, VE e BESS. O FV estará instalado no telhado da SH será responsável por gerar energia durante o dia, ou seja, no intervalo de tempo de 06h00 da manhã até 18h00 da tarde.

O BESS pode ser considerado como uma carga controlável, pois ele pode atuar como forma de armazenar a energia excedente gerada pelo FV ou a energia da rede quando o preço é elevado, atuando como uma fonte de alimentação fornecendo parte da energia armazenada

para a casa ou vendendo essa energia para a rede em períodos de pico, esse sistema de armazenamento de energia pode realizar a carga e descarga em diferentes condições conforme seu modo de operação, para evitar os horários de pico de energia e ter mais eficiência com o uso da energia na residência.

O VE tem função semelhante ao BESS, pois funciona tanto como fonte de energia através do veículo-rede (V2G) como uma carga controlável que absorve energia da rede, porém a energia armazenada na bateria está sempre disponível para alimentar os eletrodomésticos ou ser vendida, já a do VE só está disponível nos momentos em que ele não esteja sendo utilizado como um meio de transporte pelos usuários. Tanto a bateria quanto o VE serão objetos de agendamento nesta dissertação, pois quando eles estão sendo carregados como uma carga, o HEMS tem a autonomia de interromper o carregamento conforme programado e/ou move-lo para outro momento. Para fins de definição do modelo, em nossa abordagem, a variação da eficiência das baterias, tanto do BESS quanto do VE, não será considerada.

A Tabela 4 descreve os elementos presentes no modelo matemático, em que são apresentados os conjuntos, parâmetros e variáveis. Nesse modelo, a função objetivo tem como finalidade realizar o *Scheduling* no sistema de gerenciamento de energia doméstica para determinar as melhores programações de operação para os aparelhos controláveis e não controláveis, e a quantidade de carga do BESS e do VE para cada etapa de tempo das operações, para obter a minimização dos custos de eletricidade considerando as restrições físicas dos aparelhos.

Tabela 4 – Descrição dos elementos presentes no modelo matemático proposto.

Conjunto	Descrição
L^C :	Conjunto de cargas controláveis
L^{NC} :	Conjunto de cargas não controláveis
L :	$L: L^{NC} \cup L^C$
H :	Nº de horas
Parâmetro	Descrição
c_l^{ANC}	Custo dos aparelhos não controláveis
C_{LIG}^{ANC}	Custo de ligação das cargas não controláveis
C_l^{NAT} :	Custo de não atendimento da carga l
C_{NAT} :	Custo de não atendimento de todas as cargas
C_{buy} :	Custo para comprar energia

C_{sell} :	Custo para vender energia
DP :	Duração do período em hora; $DP = 1$
E_l	Parâmetro que representa a energia mínima para funcionamento de uma carga l
E_{SOC}^B	Estado da carga do BESS
E_{SOC}^{VE}	Estado da carga do VE
E_h^{PV}	Energia residencial PV produzida no período de tempo h
E_{UR}^B	Capacidade de energia armazenada no BESS
E_{UR}^{VE}	Capacidade de energia armazenada no VE
η_h^B	Rendimento de carregamento/descarregamento do BESS no período de tempo h
η_h^{VE}	Rendimento de carregamento/descarregamento do VE no período de tempo h
NP_l	Número de períodos que a carga l deve funcionar durante 1 dia
α_h	Fator de redução da tarifa de venda de energia no período de tempo h ; $\alpha_h \in [0,1]$
P_{lh} :	Potência da carga l no período de tempo h
P_h^{IBch}	Potência máxima de carga do BESS no período de tempo h
$P_h^{BI dh}$	Potência máxima de descarga do BESS no período de tempo h
P_h^{IVEch}	Potência máxima de carga do VE no período de tempo h
$P_h^{VEI dh}$	Potência máxima de descarga do VE no período de tempo h
T_h^{buy}	Tarifa de compra de energia no período de tempo h
T_h^{sell}	Tarifa de venda de energia no período de tempo h
N_{lh_on}	Parâmetro que representa o número de vezes que a carga l pode ser ligada por período de tempo h
TS_{ht}	Parâmetro que representa a janela de tempo de operação para cada carga l no período de tempo h
ε	Um valor significativamente pequeno, tal que $\varepsilon \geq 0$
M	Um escalar significativamente maior do qualquer outro valor possível para os parâmetros e variáveis do sistema

Variável	Descrição
e_h^{BI}	Variável contínua que indica a energia direcionada da bateria ao inversor no período de tempo h
e_h^{IB}	Variável contínua que indica a energia direcionada do inversor para a bateria no período de tempo h
$e_0^B = e_{ini}^B$	Variável contínua que indica a energia inicial da bateria, ou seja, quando $h = 0$
e_h^B	Variável contínua que indica a energia atual da bateria no período de tempo h
e_h^C	Variável contínua que indica a energia drenada ou desperdiçada (C) do sistema no período de tempo h

e_h^l	Variável contínua que indica a energia total das cargas no período de tempo h
e_{lh}	Variável contínua que indica a energia de cada uma das cargas no período de tempo h
e_h^{GI}	Variável contínua que indica a energia comprada da rede no período de tempo h
e_h^{IG}	Variável contínua que indica a energia vendida para rede no período de tempo h
e_h^{IVE}	Variável contínua que indica a energia direcionada do inversor para o VE no período de tempo h
e_h^{VEI}	Variável contínua que indica a energia direcionada do VE para o inversor no período de tempo h
$e_0^{VE} = e_{ini}^{VE}$	Variável contínua que indica a energia inicial do VE, ou seja, quando $h = 0$
e_h^{VE}	Variável contínua que indica a energia atual do VE no período de tempo h
n_{pd}_l	Variável discreta que indica o número de períodos em que as cargas controláveis estão ligadas/desligadas
t_{lh}	Variável binária que representa se a carga l está ligada/desligada no período de tempo h
ton_{lh}	Variável binária que representa a ligação da carga não controlável l no período de tempo h
ton_l	Variável binária representa a ligação da carga l não controlável no instante h
n_{lh_on}	Variável discreta que representa o número de vezes que a carga l foi ligada por período h
τ_{hl}	Variável contínua que representa o tempo de funcionamento h de uma carga l dentro da janela de funcionamento
τ_{hl}^{min}	Variável continua que representa o tempo mínimo de funcionamento h de uma carga controlável l dentro da janela de funcionamento
x_h^{GI}	Variável discreta que indica compra de energia da rede; $x_h^{GI} = 1$
x_h^{IG}	Variável discreta que indica venda de energia para rede; $x_h^{IG} = 1$
ch_h^B	Variável discreta que indica o carregamento do BESS; $ch_h^B = 1$
dh_h^B	Variável discreta que indica a descarga do BESS; $dh_h^B = 1$
$NPch_h^B$	Variável discreta que representa o número de períodos de carga do BESS durante um dia
$NPdh_h^B$	Variável discreta que representa o número de períodos de descarga do BESS durante um dia
ch_h^{VE}	Variável discreta que indica o carregamento do VE; $ch_h^{VE} = 1$
dh_h^{VE}	Variável discreta que indica a descarga do VE; $dh_h^{VE} = 1$
$NPch_h^{VE}$	Variável discreta que representa o número de períodos de carga do VE durante um dia
$NPdh_h^{VE}$	Variável discreta que representa o número de períodos de descarga do VE durante um dia

Fonte: Autora (2022).

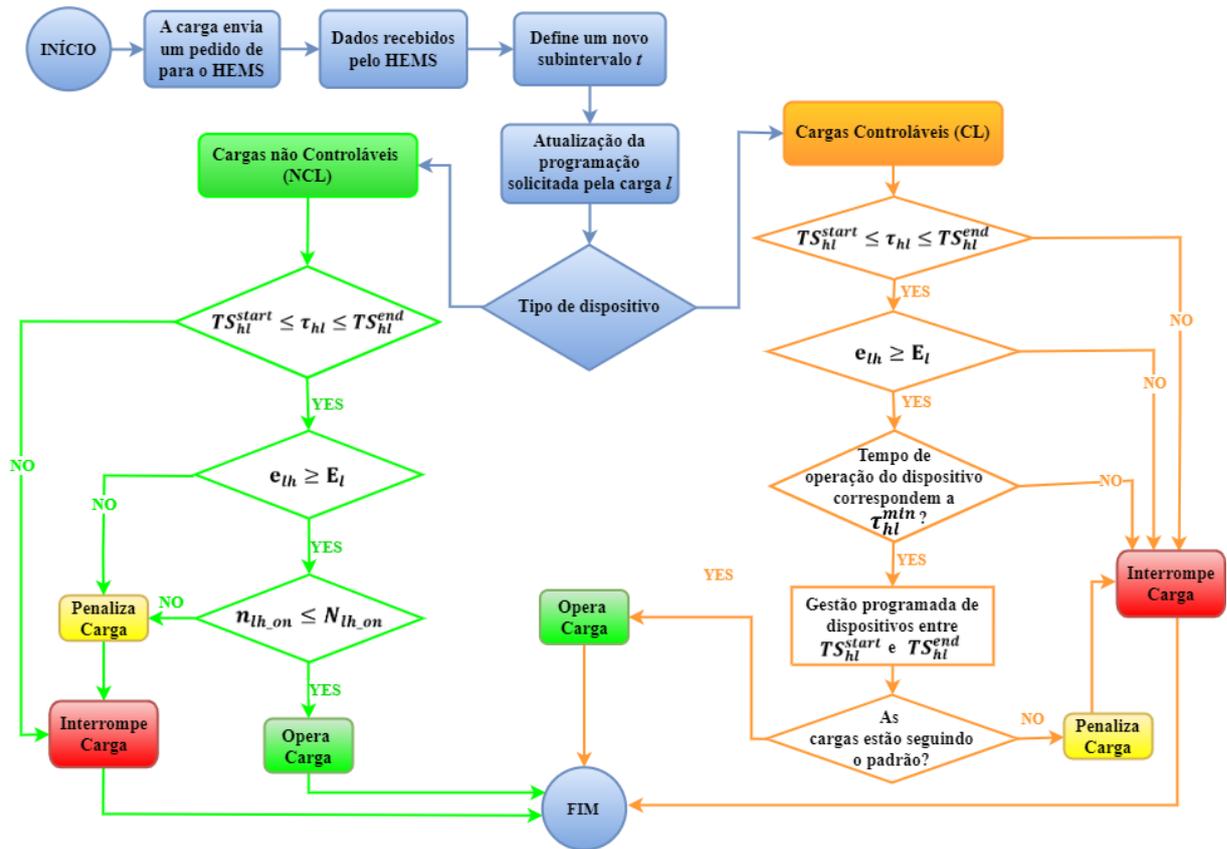
Para uma melhor descrição do processo da solução da problemática proposta, é apresentado na Figura 14 um fluxograma com a descrição do processo gerenciamento de energia doméstica proposta. Na figura é definido que a energia consumida por cada

aparelho/carga (l) durante o subintervalo τ_{hl} é representada por e_{lh} . Para a carga e_{lh} funcionar ela precisa ser igual ou maior que E_l . O E_l é definido como um parâmetro que representa a energia mínima para o funcionamento de uma carga l . Como cada carga tem um intervalo para funcionar, se o consumo não estiver dentro desse intervalo TS_{hl}^{start} e TS_{hl}^{end} o consumo de energia de cada carga será zero.

De maneira mais detalhada, o eletrodoméstico envia um sinal da necessidade por eletricidade para o controlador (HEMS) que recebe a demanda e define o subintervalo τ_{hl} de funcionamento da e_{lh} para ser atualizada a programação dos eletrodomésticos com a demanda solicitada, depois é feita a verificação que qual tipo de carga está enviando a demanda, se for o ANC é verificado se está entre TS_{hl}^{start} e TS_{hl}^{end} , caso não esteja a carga é interrompida, se sim, a carga passa para a verificação se a energia necessária para operá-la é $e_{lh} \geq E_l$, se não estiver ocorre a penalização e a carga é interrompida, se estiver é verificado se o número de vezes que a carga l foi ligada por período h é menor ou igual ao número de vezes que a carga l pode ser ligada por período de tempo h , e não estiver de acordo a carga é penalizada e interrompida, se ela estiver opera a carga e finaliza o processo.

Se o tipo de carga for AC é verificado se está entre TS_{hl}^{start} e TS_{hl}^{end} , se não estiver a carga é interrompida, se sim a carga passa para a verificação se a energia necessária para operar a carga está disponível e se é $e_{lh} \geq E_l$, caso não esteja a carga é interrompida, se estiver é verificado se o tempo demandado para a carga operar está de acordo com o τ_{hl}^{min} , se não estiver a carga é interrompida, se estiver o gerenciamento é programado entre TS_{hl}^{start} e TS_{hl}^{end} , posteriormente é verificado se a carga está seguindo esse padrão programado, se não estiver ela é penalizada e interrompida, e se estiver ela opera e finaliza o processo.

Figura 14 – Fluxograma com a descrição da dinâmica de aplicação do gerenciamento de energia doméstica proposta.



Fonte: Autora (2023).

- **Função Objetivo**

A função objetivo, representada por (1), busca as melhores maneiras de realizar as programações dos eletrodomésticos, e conseqüentemente a minimização dos custos energéticos residenciais. A função objetivo tem três componentes, o custo de compra (C_{buy}), custo de venda (C_{sell}) e custo de não atendimento de todas as cargas C_{NAT} .

$$\text{Minimize } Z = C_{buy} - C_{sell} + C_{NAT} \quad (1)$$

Onde,

$$C_{buy} \geq \sum_{h \in H} T_h^{buy} \cdot e_h^{GI} \quad , \quad \forall h \in H \quad (2)$$

$$C_{sell} = \sum_{h \in H} \alpha_h \cdot T_h^{sell} \cdot e_h^{IG} \quad , \quad \forall h \in H \quad (3)$$

$$C_{NAT} \geq \sum_{l \in L} C_l^{NAT} + \sum_{l \in L^{ANC}} CNA_l c_l^{ANC} \quad , \quad \forall h \in H \quad , \quad \forall l \in L \quad (4)$$

$$C_l^{NAT} = CNA_l \cdot (NP_l - npd_l) \quad , \quad \forall h \in H \quad (5)$$

A equação (2) apresenta o custo para comprar energia (C_{buy}). Em (3) é apresentado o custo para venda de energia (C_{sell}). A equação (4) se refere ao não atendimento de todas as cargas, se leva em conta o custo de não atendimento das cargas não controláveis, representado por c_l^{ANC} . Na equação (5) é encontrado o custo de não atendimento da carga l e é representado por (C_l^{NAT}), em que o NP_l representa o número de períodos de uma carga durante um dia.

O T_h^{buy} representa a tarifa sobre a energia que é comprada da concessionária, o e_h^{GI} e o e_h^{IG} denotam a energia que está entrando para a residência e a energia que está sendo vendida para a rede, respectivamente. O α_h é um parâmetro que representa o fator de redução sobre a tarifa de venda T_h^{sell} , ou seja, é responsável por verificar os momentos mais adequados para vender ou não vender a energia produzida pelo prosumidor para a concessionária, frisa-se que a energia vendida à rede é aplicável apenas quando a energia excedente está disponível na residência.

- **Restrições referentes aos eletrodomésticos da residência**

Tendo como base o modelo conceitual do circuito elétrico relacionado ao HEMS apresentando na Figura 15, é possível obter as equações de restrição do modelo denotadas no intervalo de (6 – 52). As restrições contidas no intervalo de (6 – 16) são referentes aos eletrodomésticos da residência. Na equação (6), tem-se a representação de todas as cargas que não são atendidas no instante $h = 0$, onde a variável binária t_{lh} define se a carga (l) está ligada/desligada no período de tempo h . A equação (7) mostra as cargas que não estão ligadas no instante $h = 0$ de acordo com a variável binária ton_{lh} , apresentada.

A equação (8) representa a equação de balanço de energia para a carga do sistema de energia residencial, ou seja, o e_h^L refere-se ao cálculo do total de energia de todas as cargas em cada *slot* de tempo. A equação (9) representa que a energia de cada uma das cargas (e_{lh}) deve ser menor ou igual a potência da carga (L) na hora (h) pela duração do período em horas vezes o tempo de ligado/desligado. Enquanto, a equação (10) denota o número de períodos em que as cargas controláveis estão ligadas/desligadas.

$$t_{lh} = 0, \quad \forall l \in L, \quad \forall h \in H \quad (6)$$

$$ton_{lh} = 0, \quad \forall l \in L^{ANC}, \quad \forall h \in H \quad (7)$$

$$e_h^L = \sum_{l \in L} e_{lh}, \quad \forall h \in H, \quad \forall l \in L \quad (8)$$

$$e_{lh} \geq P_{lh} \cdot DP \cdot t_{lh}, \quad \forall h \in H, \quad \forall l \in L \quad (9)$$

$$npd_l = \sum_{h \in H} t_{lh}, \quad \forall l \in L \quad (10)$$

$$e_h^L \geq \sum_{l \in L} e_{lh} \cdot t_{lh}, \quad \forall h \in H, \quad \forall l \in L \quad (11)$$

$$t_{lh} \leq TS_{hl}, \quad \forall h \in H, \quad \forall l \in L \quad (12)$$

$$ton_{lh} \geq (t_{lh} - t_{l(h-1)}) \quad , \quad \forall l \in L^{ANC}, \quad \forall h \in H \quad (13)$$

$$ton_l \geq \sum_{h \in H} ton_{lh} \quad , \quad \forall h \in H, \quad \forall l \in L^{ANC} \quad (14)$$

$$M \cdot (1 - c_l^{ANC}) + ton_l - \varepsilon \geq NX_l \quad , \quad \forall l \in L^{ANC} \quad (15)$$

$$-M \cdot c_l^{ANC} + ton_l \leq NX_l \quad , \quad \forall l \in L^{ANC} \quad (16)$$

As equações (11) e (12) são, respectivamente, restrições referentes ao atendimento das cargas e das janelas de tempo de operações das cargas. A representação matemática das restrições para o corte das cargas ANC é definida nas equações (13 – 16). A equação (13) representa a ligação da carga l no instante h . A equação (14) denota a quantidade de vezes que a carga l não controlável foi ligada. As equações de (15 – 16) definem que o custo de não atendimento para as cargas não controláveis seja garantido, determinando o número de vezes que as ANC foram ligadas/desligadas. Sendo M um escalar significativamente maior do qualquer outro valor possível para os parâmetros e variáveis do sistema.

- **Restrições do fluxo de carga e balanço energético**

As restrições que trabalham com fluxo de carga e o balanço energético residencial estão contidas no intervalo de (17 – 22). Na equação (17) é realizado o balanço energético sobre o inversor para determinar a energia que sai e que entra na residência. A parcela e_h^C representa o

momento em que houver energia excedente e não puder ser utilizada para carregar o sistema de armazenamento de energia (BESS e VE), e/ou não puder ser injetada na rede.

$$E_h^{PV} + e_h^{GI} + e_h^{BI} + e_h^{VEI} = e_h^L + e_h^{IG} + e_h^{IVE} + e_h^{IB} + e_h^C, \quad \forall h \in H \quad (17)$$

$$-M(x_h^{IG}) + e_h^{IG} \leq 0, \quad \forall h \in H \quad (18)$$

$$e_h^{IG} \geq 0 + \varepsilon - M(1 - x_h^{IG}), \quad \forall h \in H \quad (19)$$

$$-M(x_h^{GI}) + e_h^{GI} \leq 0, \quad \forall h \in H \quad (20)$$

$$e_h^{GI} \geq 0 + \varepsilon - M(1 - x_h^{GI}), \quad \forall h \in H \quad (21)$$

$$x_h^{GI} + x_h^{IG} \leq 1, \quad \forall h \in H \quad (22)$$

$$x_h^{GI} \leq M \cdot e_h^{GI}, \quad \forall h \in H \quad (23)$$

$$x_h^{IG} \leq M \cdot e_h^{IG}, \quad \forall h \in H \quad (24)$$

As equações descritas no intervalo de (18 – 24) definem os fluxos relacionados a energia que é comprada da rede e a energia que é vendida para a rede, em que estabelecido que não pode haver simultaneidade nos dois fluxos, pois, ou a energia está direcionada da rede para o inversor ou do inversor para a rede. As equações (18) e (19) garantem que seja respeitada a restrição de injeção de energia rede no momento em a casa não estiver recebendo energia da rede. De modo semelhante para as equações (20) e (21) garantem que seja respeitada a restrição de compra de energia na rede, no momento em que a rede não está recebendo energia da casa. A equação (22) garante que a compra e venda de energia não possa ser realizada no mesmo momento. A restrição para limitar compra de energia a determinados períodos é apresentado em (23). Na restrição (24) é utilizada para limitar injeção de energia na rede.

- **Restrições operacionais do BESS**

Nas equações descritas no intervalo de (25 – 30) é feita a representação matemática da modelagem das restrições quanto a carga e descarga do BESS. As equações (25) e (26) definem a carga inicial e o balaço energético do BESS, respectivamente. Sendo que quantidade de energia que será armazenada por *slot* no BESS é definida por e_h^{IB} e o rendimento de carregamento e descarregamento da bateria por η_h^B . As equações (27) e (28) apresentam a carga mínima e máxima no BESS, considerando E_{UR}^B que é a capacidade do BESS e estado da carga

da bateria que é definido por E_{SOC}^B . As equações (29) e (30) definem o limite de potência de carga e descarga no BESS no inversor.

$$e_0^B = e_{ini}^B, \quad \forall h \in H \quad (25)$$

$$\eta_h^B * e_h^{IB} + e_{(h-1)}^B = e_h^B + \left((1 - \eta_h^B) + 1 \right) * e_h^{BI}, \quad \forall h \in H \quad (26)$$

$$e_{\min(h)}^B \geq E_{UR}^B * (1 - E_{SOC}^B), \quad \forall h \in H \quad (27)$$

$$e_{\max(h)}^B \leq E_{UR}^B, \quad \forall h \in H \quad (28)$$

$$e_h^{IB} \leq P_h^{IBch} * \frac{24}{\left(\frac{NP_l}{24}\right) * H}, \quad \forall h \in H \quad (29)$$

$$e_h^{BI} \leq P_h^{BI dh} * \frac{24}{\left(\frac{NP_l}{24}\right) * H}, \quad \forall h \in H \quad (30)$$

- **Restrições de fluxo de carga e descarga do BESS**

As restrições que trabalham com fluxo de carregamento do BESS estão descritas no intervalo de (31 – 35), elas são responsáveis por definir os fluxos relacionados a carga e descarga do BESS, em que estabelecido que não pode haver simultaneidade nos dois fluxos, pelo fato de que esses fluxos de carga e descarga são excludentes, ou a energia está direcionada do BESS para o inversor ou do inversor para BESS. As equações (31) e (32) garantem que seja respeitada a restrição de carregamento do BESS, em que ele só poderá ser carregado no momento em que não estiver sendo feita a descarga de energia do BESS para o inversor. De modo semelhante, as equações (33) e (34) garantem o BESS só poderá ser descarregado no momento em que não estiver sendo feito carregamento do BESS. A equação (35) garante que o carregamento e o descarregamento do BESS não possam ser realizados no mesmo momento. As equações (36) e (37) representam as restrições para o número de períodos de carga e descarga do BESS.

$$M(1 - ch_h^B) + e_h^{IB} \geq 0, \quad \forall h \in H \quad (31)$$

$$-M(ch_h^B) + e_h^{IB} \leq 0, \quad \forall h \in H \quad (32)$$

$$M(1 - dh_h^B) + e_h^{BI} \geq 0, \quad \forall h \in H \quad (33)$$

$$-M(dh_h^B) + e_h^{BI} \leq 0, \quad \forall h \in H \quad (34)$$

$$ch_h^B + dh_h^B \leq 1, \quad \forall h \in H \quad (35)$$

$$\sum_{h \in H} ch_h^B \leq NPch_h^B, \quad \forall h \in H \quad (36)$$

$$\sum_{h \in H} dh_h^B \leq NPdh_h^B, \quad \forall h \in H \quad (37)$$

- **Restrições operacionais do VE**

As equações contidas no intervalo de (38 – 45) são responsáveis pelas restrições operacionais do VE. A carga do VE é realizada com a eletricidade derivado da rede e da energia PV. A descarga é feita quando o veículo não está disponível em casa ou quando ele funciona como uma bateria, ou seja, a descarga é feita quando o prosumidor está utilizando o veículo como meio de transporte ou quando a energia da bateria do VE está sendo direcionada para o funcionamento das cargas controláveis e não controláveis. As equações (38) e (39) definem a carga inicial e o balanço energético do VE. Sendo que quantidade de energia que será armazenada por *slot* no VE é representada por e_h^{IVE} e o rendimento de carregamento e descarregamento no VE por η_h^{VE} . As equações (40) e (41) apresentam a carga mínima e máxima no VE, onde a capacidade do VE é definido por E_{UR}^{VE} e estado da carga do VE é representado por E_{SOC}^{VE} . As equações (42) e (43) definem o limite de potência de carga e descarga do VE no inversor. As equações (44) e (45) representam as restrições das janelas tempo de operação do VE, definindo que quando a $e_h^{IVE} \geq 0$ o VE funcionará como uma carga e quando a $e_h^{VEI} \geq 0$, o VE funcionará como uma bateria.

$$e_0^{VE} = e_{ini}^{VE} \quad (38)$$

$$\eta_h^{VE} * e_h^{IVE} + e_{(h-1)}^{VE} = e_h^{VE} + ((1 - \eta_h^{VE}) + 1) * e_h^{VEI}, \quad \forall h \in H \quad (39)$$

$$e_{\min(h)}^{VE} \geq E_{UR}^{VE} * (1 - E_{SOC}^{VE}), \quad \forall h \in H \quad (40)$$

$$e_{\max(h)}^{VE} \leq E_{UR}^{VE}, \quad \forall h \in H \quad (41)$$

$$e_h^{IVE} \leq P_h^{IVEch} * \frac{24}{\left(\frac{NP_l}{24}\right) * H}, \quad \forall h \in H \quad (42)$$

$$e_h^{VEI} \leq P_h^{VEIdh} * \frac{24}{\left(\frac{NP_l}{24}\right) * H}, \quad \forall h \in H \quad (43)$$

$$e_h^{VEI} \leq M * TS_{hl}, \quad \forall h \in H, \quad \forall l \in L \quad (44)$$

$$e_h^{IVE} \leq M * TS_{hl} , \forall h \in H , \forall l \in L \quad (45)$$

- **Restrições de fluxo de carga e descarga do VE**

As restrições que trabalham com fluxo de carregamento do VE estão descritas no intervalo (46 – 52) representam que, ou a energia está entrando durante a carga do VE ou a energia está saído durante a descarga do VE, pois a carga e descarga não podem ocorrer no mesmo período de tempo. As equações (46) e (47) garantem que seja respeitada a restrição de carregamento do VE, em que ele só poderá ser carregado no momento em que não estiver sendo feita a descarga de energia do VE para o inversor. De modo semelhante, as equações (48) e (49) garantem o VE só poderá ser descarregado no momento em que não estiver sendo feito o seu carregamento. A equação (50) garante que o carregamento e o descarregamento do VE não possam ser realizados no mesmo momento. As equações (51) e (52) representam as restrições para o número de períodos de carga e descarga do VE.

$$M.(1 - ch_h^{VE}) + e_h^{IVE} \geq 0 , \quad \forall h \in H \quad (46)$$

$$-M.(ch_h^{VE}) + e_h^{IVE} \leq 0 , \quad \forall h \in H \quad (47)$$

$$M.(1 - dh_h^{VE}) + e_h^{VEI} \geq 0 , \quad \forall h \in H \quad (48)$$

$$-M(dh_h^{VE}) + e_h^{VEI} \leq 0 , \quad \forall h \in H \quad (49)$$

$$dh_h^{VE} + ch_h^{VE} \leq 1 , \quad \forall h \in H \quad (50)$$

$$\sum_{h \in H} ch_h^{VE} \leq NPch_h^{VE} , \quad \forall h \in H \quad (51)$$

$$\sum_{h \in H} dh_h^{VE} \leq NPdh_h^{VE} , \quad \forall h \in H \quad (52)$$

Este modelo proposto visa realizar o *Scheduling* no sistema de gerenciamento de energia doméstica para determinar as melhores programações de operação para os aparelhos AC e ANC, e a quantidade de carga do BESS e do VE para cada etapa de tempo das operações, para obter a minimização dos custos de eletricidade considerando as restrições físicas dos aparelhos.

5. ESTUDO DE CASO

Este capítulo visa desenvolver a experimentação do modelo desenvolvido aplicado aos problemas que tenham dados e conformações muito próximas de problemas reais. São realizadas várias ponderações a respeito do problema buscando descrevê-lo qualitativamente. A seguir, é realizada a caracterização quantitativa, na qual são apresentadas as premissas que serão levadas em consideração na definição do escopo e na definição do modelo desenvolvido. Posteriormente, é realizado o processo de identificação dos dados que serão levados em consideração na elaboração da modelagem, a exemplo os dados de entrada dos eletrodomésticos controláveis e não controláveis. Para a construção do modelo foram definidos quais seriam os dados de entrada, para depois a modelagem do problema ser criada com uma abordagem sequencial e detalhada. Por último é apresentado e analisado os casos propostos para a pesquisa.

Também é apresentando a proposta e análise de 6 casos desenvolvidos visando realizar a validação da eficácia do modelo determinístico proposto nesta dissertação. Para isso, a modelagem apresentada foi implementada utilizando a linguagem de programação Python, no ambiente de desenvolvimento do Visual Studio Code. Para solucionar o problema de otimização do modelo PLIM as simulações foram realizadas utilizando o solver (CPLEX) e executados em um computador Windows 10 (64 bits) Intel Core i5-7200U CPU @ 2.50GHz com memória de 4,00 GB.

5.1. DEFINIÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA

Os dados de entrada referentes aos perfis dos eletrodomésticos controláveis e não controláveis da residência estão descritos na Tabela 4. Deve ser observado que a escolha dos eletrodomésticos e sua classificação foram baseadas nas informações de Tascikaraoglu, Boynuegri & Uzunoglu (2014); Lu, Zhang & Lü (2020) e Radu, Munteanu & Agavanakis (2021). Na Tabela 4 é apresentada a identificação (ID) para cada um dos eletrodomésticos que foram considerados para o estudo de caso, sua respectiva janela de operação (denominada *time slot*), tempo de funcionamento em horas, potência média, energia consumida em 15 minutos, número de períodos que serão utilizados e o número de vezes que serão ligados. Esses dados foram considerados para serem utilizados na solução dos 3 casos apresentados na seção 4.2.

Tabela 5 – Dados de entrada dos eletrodomésticos controláveis e não controláveis utilizados na aplicação dos casos.

ID	Aparelhos	TIPO	TIME SLOT	HOR	POT	EN	NUMP	NUMX
1	Ar condicionado	AC	22:00 – 6:00	5	1,14	0,285	20	20
2	Máquina de lavar roupa	AC	6:30 – 20:00	1,5	1,8	0,45	6	6
3	Secadora	AC	6:30 – 20:00	1	2,5	0,625	4	4
4	Máquina de lavar louça	AC	8:00 – 11:00, 13:00 – 16:00, 21:00 – 23:00	1	1,7	0,425	4	4
5	Chaleira elétrica	AC	6:00 – 9:00, 13:00 – 15:00	0,25	1,2	0,3	1	1
6	Veículo elétrico	AC	22:00 – 6:00	5	3	0,75	20	20
7	Cafeteira	AC	6:00 – 9:30	0,25	1,2	0,3	1	1
8	Luzes	ANC	18:00 – 23:30	5	0,8	0,2	1	20
9	TV	ANC	17:00 – 23:00	3	0,1	0,025	2	6
10	Micro-ondas	ANC	11:30 – 13:30, 17:00 – 20:00	1	1,7	0,425	1	4
11	Aspirador de pó	ANC	06:00 – 9:00, 14:00 – 16:00	0,5	2	0,5	1	2
12	Refrigerador	ANC	00:00 – 23:59	24	0,225	$\frac{0,056}{2}$	96	1
13	Laptop	ANC	8:30 – 23:00	2	0,1	0,025	2	4
14	Secador de cabelo	ANC	06:00 – 08:00, 19:30 – 22:00	0,5	1,536	0,384	1	2
15	Ferro de Passar	ANC	09:00 – 11:00, 15:00 – 17:00	0,5	1,921	$\frac{0,480}{2}$	1	2
16	Torradeira	ANC	6:00 – 9:30	0,25	0,708	0,177	1	1

Fonte: Autora (2023).

Na realização das simulações foram utilizados os dados previstos de tarifas de eletricidade, incidência solar e os intervalos de tempo que as cargas são utilizadas. O horizonte de agendamento é de 24 horas e são discretizados igualmente em 96 faixas horárias de operação, sendo cada faixa horária de 15 minutos. Assume-se que o HEMS proposto nos casos possui planta de geração fotovoltaica instalada com potência de 3,3kWp conectada à rede elétrica por meio de um inversor híbrido que possui 3,6 kW de potência CA (P_{CA}^{INV}) e 3 kW de potência CC (P_{CC}^{INV}), possui um BESS que é composto por um banco de baterias de lítio de 20 kWh de

capacidade, um VE que contém uma bateria de 20 kWh de capacidade e um inversor. Os parâmetros técnicos de entrada para a operação do modelo estão descritos na Tabela 6.

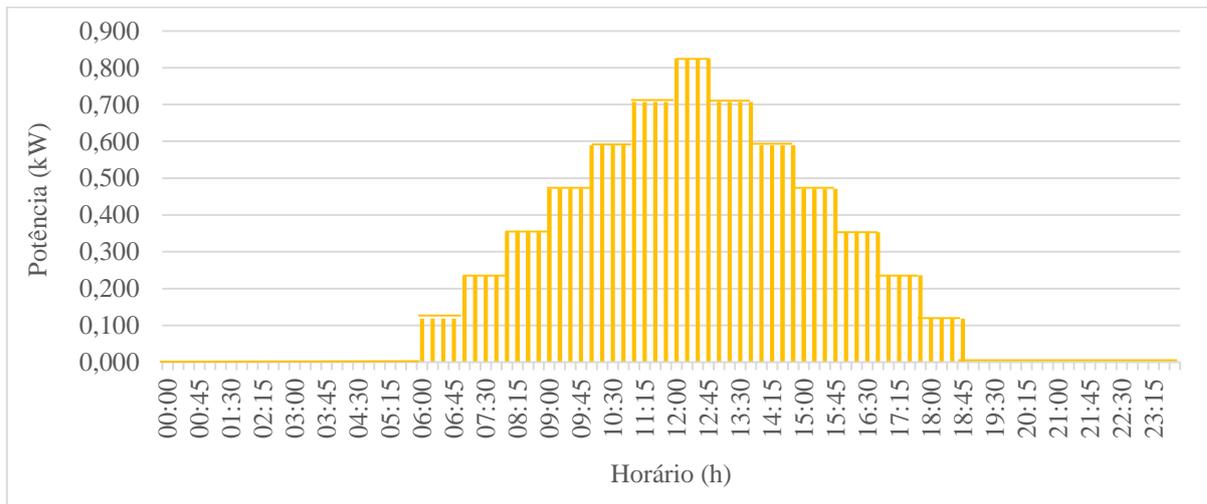
Tabela 6 – Parâmetros técnicos de entrada para a operação do HEMS.

PARÂMETROS DE ENTRADA DO HEMS	
Sistema de Armazenamento por Baterias	$E_{UR}^B = 20kWh; \eta_h^B = 95\%; E_{DOD}^B = 90\%; P_h^{IBch} = P_h^{BI dh} = 3kW;$ $e_0^B = e_{ini}^B = 1,8kW$
Veículo Elétrico	$E_{UR}^{VE} = 20kWh; \eta_h^{VE} = 95\%; E_{DOD}^{VE} = 90\%; P_h^{IVEch} = P_h^{VEI dh} = 3kW;$ $e_0^{VE} = e_{ini}^{VE} = 1,8kW$
Inversor Híbrido	$P_{CA}^{INV} = 3,6kW; P_{CC}^{INV} = 3kW$
Energia Fotovoltaica	3,3kWp

Fonte: Autora (2023).

Quanto ao perfil de energia fotovoltaica, visando simular os dados de um dia de geração FV, é utilizado o perfil de geração FV apresentado por De Shayani (2006), como pode ser visto na Figura 15, em que se apresenta um gráfico do perfil de geração FV para 24h00 discretizado para cada 15 minutos.

Figura 15 – Gráfico do perfil de geração FV para 24h00 discretizado para cada 15 minutos.

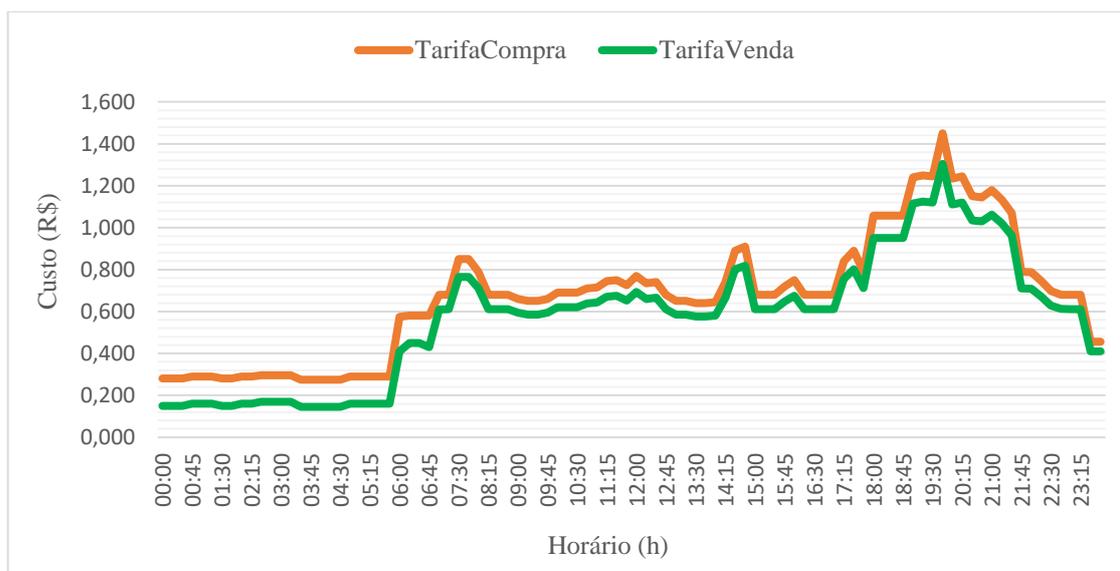


Fonte: Autora (2023).

Entende-se que as tarifas de energia, tanto de compra como de venda, são importantes dados para o gerenciamento de energia residencial. No estudo de caso apresentado nesta dissertação é utilizado o sistema de tarifação variável no tempo para simular uma tarifa de

tempo real, porém as incertezas contidas na previsão do custo da tarifa ao longo do dia não são consideradas. Na Figura 16 é apresentado um gráfico com o perfil de tarifa de compra e venda de energia utilizado nas simulações, este perfil de tarifa é o mesmo perfil de tarifa utilizado por De Azevedo et al. (2022), sendo o valor da compra de energia entre 10% e 45% maior que a tarifa de venda de energia.

Figura 16 – Perfil de tarifa variável utilizada no estudo de caso.



Fonte: Autora (2023).

5.2. CASOS PARA VALIDAÇÃO

Para fins de validar a metodologia proposta 6 casos foram validados. Os casos utilizarão os dados tarifários apresentados pela ANEEL (2023), em que a tarifa que será utilizada para a validação de todos os casos é a denominada tarifa branca, que é a tarifa utilizada pelos consumidores residenciais, apresentada na Figura 16. A caracterização dos casos para validação é apresentada a seguir:

A caracterização do Caso 1 é feita sem a utilização do FV, sem o BESS, sem veículo elétrico e sem janela de tempo, além disso não se tem a possibilidade de exportação de energia. Neste caso se visa avaliar o custo de atendimento das cargas a partir de uma tarifa definida, no caso a tarifa branca.

O Caso 2 é caracterizado tendo a utilização do FV, porém, sem a utilização do BESS, sem o VE e sem janela de tempo, não tendo a possibilidade de vender energia para rede. Visando avaliar o custo de atendimento das cargas a partir da tarifa branca e fazendo uso do PV.

Na caracterização do Caso 3 são utilizados o FV e a janela de tempo, e não se tem o uso do VE e do BESS, bem como não é possível exportar energia. Como nos anteriores, se visa avaliar o custo de atendimento das cargas a partir da tarifa branca e fazendo uso do PV e da janela de tempo.

O Caso 4 é caracterizado, com o uso do FV, com a janela de tempo e com o BESS, mas sem fazer uso do VE e da exportação de energia. Neste caso, pretende-se avaliar o custo de atendimento das cargas a partir da tarifa definida, em que se exclui somente o VE.

No caso 5 se tem a utilização do FV, com o veículo elétrico, com a janela de tempo e com o BESS, porém é feita a exclusão da possibilidade de exportação de energia. Neste caso, pretende-se avaliar o custo de atendimento das cargas a partir da tarifa definida e com o uso de todos os RED disponíveis na residência.

A caracterização do caso 6 é feita de maneira semelhante ao 5, em que se tem a utilização do FV, com o veículo elétrico, com a janela de tempo e com o BESS, no entanto, é feita a inclusão da possibilidade de exportação de energia. Neste caso, pretende-se avaliar o custo de atendimento das cargas a partir da tarifa definida e com o uso de todos os RED disponíveis na residência e com a possibilidade de exportação de energia.

5.3. RESULTADOS E ANÁLISES DOS CASOS

A análise dos casos apresentados na secção 5.2 foi conduzida com base nos dados dos eletrodomésticos presentes na Tabela 5, nos dados de geração fotovoltaica, nos dados do BESS e VE presentes na Tabela 6, e tendo como base os dados das tarifas de compra e venda presentes na Figura 16. Os resultados de cada caso serão apresentados nas subsecções de 5.3.1 até 5.3.2. Os resultados em cada subsecção serão divididos em: análise da compra e venda de energia (entrada e saída de energia da residência); Carga e descarga do sistema de armazenamento de energia, que é composto pelo BESS e VE; e por fim análise do perfil das cargas/aparelhos da residência em seu respectivo cenário. Frisa-se que para todos os 6 casos foi considerando o horizonte de 24 horas dividido em períodos discretos de tempo de 15 minutos.

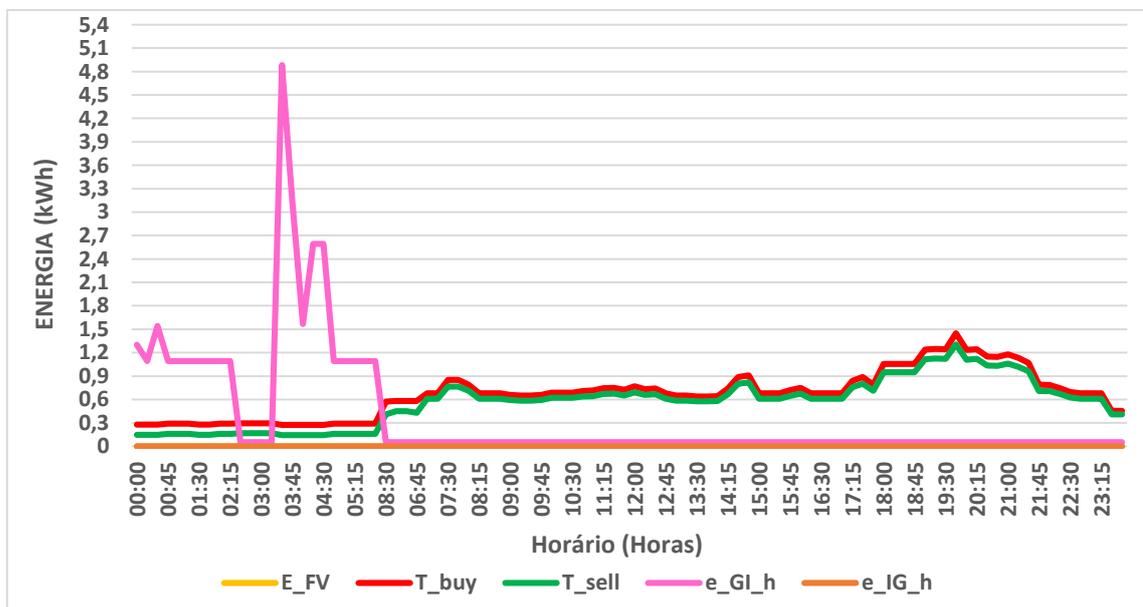
5.3.1. Caso 1

Neste caso, a residência está sendo atendida somente com a energia fornecida pela rede, ela possui o VE somente como uma carga e não como uma bateria, além disso, a residência não

faz uso do BESS, nem da energia FV, não possui a janela de tempo e nem pode exportar energia para a rede. Para tanto, foram empregadas a função objetivo e as funções-restrições apresentadas no capítulo 4. Os dados da solução do problema para este caso constam no Apêndice A.

Para analisar os resultados para o Caso 1 apresenta-se os gráficos da Figura 17 até a Figura 20, que apresentam o perfil de tarifa de compra e venda de energia relacionando o montante de energia comprada e vendida pela residência (Figura 17), o perfil de carga/descarga do VE juntamente com o perfil de consumo de energia total dos aparelhos elétricos da residência em relação as tarifas de compra/venda de energia e ao perfil de energia FV (Figura 18), sendo o VE usado neste caso somente como uma carga. Frisa-se que o perfil de carga/descarga do BESS não foi apresentado pelo fato de ele não ter sido utilizado neste caso. Além disso, são apresentados os cronogramas de funcionamento dos aparelhos elétricos resultantes (Figura 19 e 20).

Figura 17 – Perfil de tarifas compra/venda de energia em relação energia comprada/vendida pela SH para o Caso 1.



Fonte: Autora (2023).

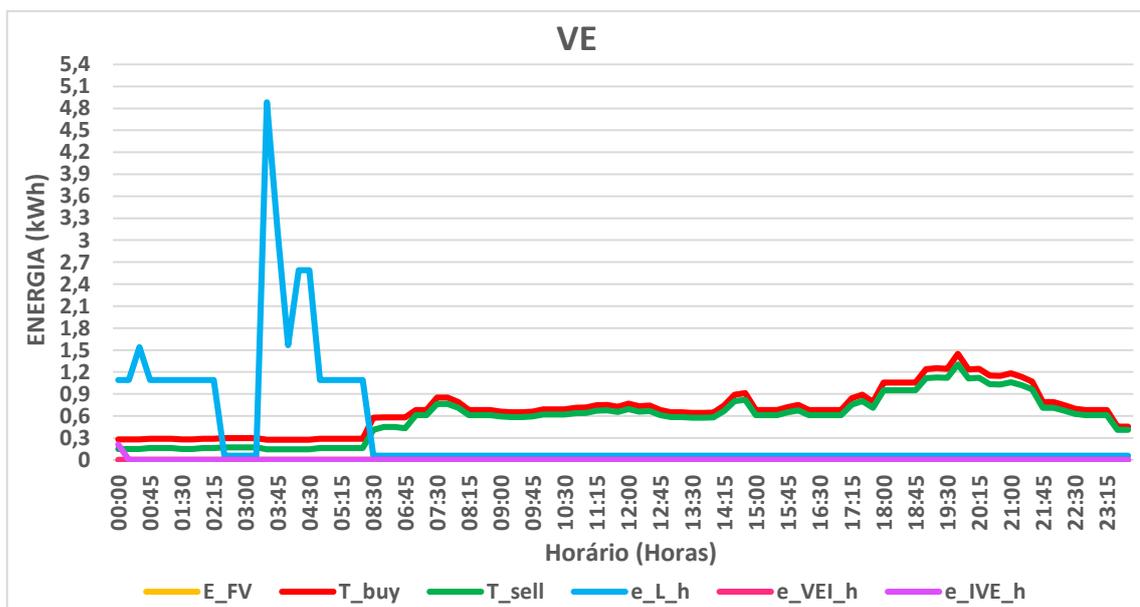
Ao analisar o gráfico contido a Figura 17 é possível verificar que a energia que entrou na residência (e_GI_h) foi comprada no período em que a tarifa para comprar a energia da rede tinha seu menor valor. Como pode ser analisado no gráfico, a energia comprada teve seu início de injeção na residência as 00h:00h e foi até as 08h:30h, aproximadamente. Frisa-se que as 03h:30h se teve o pico de atendimento chegando a 4,88kW/h de energia fornecida para a

residência. Isso pode ser explicado pelo fato de que, neste caso visava-se avaliar somente o custo de atendimento das cargas a partir de uma tarifa definida e não se considerou outros aspectos, como por exemplo o uso de janelas de tempo, fazer uso da energia solar ou utilizar de um sistema de armazenamento de energia.

Portanto, a solução encontrada para este cenário visou somente atender todas as cargas com o menor valor possível de custo, o valor de custo total otimizado que o caso obteve foi de R\$ 12,24. Vale ressaltar que esse valor foi obtido sem ter considerado o fato de que obter tanta energia no período da madrugada poderia não ser uma alternativa viável para a concessionária, por exemplo. Mas a solução deste caso prova que a metodologia empregada pode ser validada e está de acordo com o que se esperava.

A Figura 18 apresenta o comportamento da carga/descarga do VE e o comportamento das cargas totais em relação ao perfil de geração FV e ao perfil das tarifas de compra e de venda de energia.

Figura 18 – Perfil de tarifas compra/venda de energia e geração FV em relação a carga/descarga do VE e da energia total dos aparelhos elétricos residenciais para o Caso 1.



Fonte: Autora (2023).

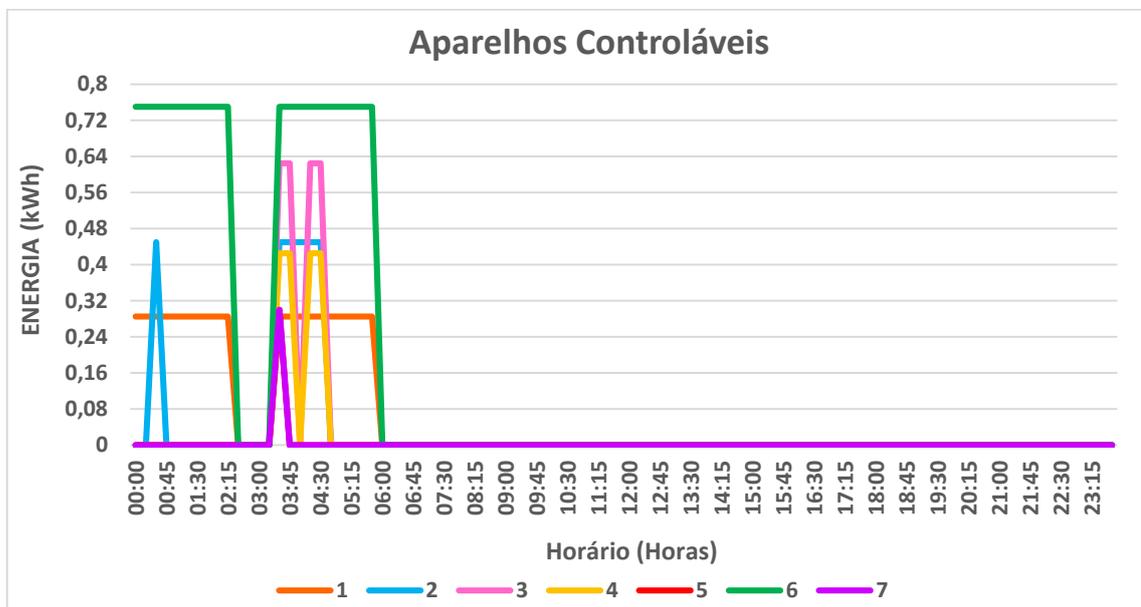
Com a análise gráfica é possível verificar que neste caso o VE foi carregado, porém ele não foi descarregado, ou seja, ele foi considerado apenas como uma carga residencial e não como uma bateria, isso é explicado pelo fato de que este caso não tem um sistema geração e armazenamento de energia. Então, é possível verificar que a energia para o carregamento do VE (e_VEI_h) foi atendida completamente atendida às 00h:00h, ou seja, quando a tarifa de compra de energia está baixa. Quanto ao perfil da energia total das cargas, é possível verificar

que elas acompanharam o perfil de compra de energia da rede (e_{GI_h}), apresentado na Figura 17, onde totais as cargas foram atendidas nos horários em que era mais barato comprar a energia da rede, o que denota que a solução obtida atendeu o que foi proposto na metodologia do estudo.

Além dos perfis de comportamento de compra/venda de energia, carga/descarga de energia do VE e BESS, e do comportamento da carga total, é feita também a análise sobre o cronograma de funcionamento dos aparelhos elétricos residências resultantes.

Na Figura 19 é exibido o cronograma de funcionamento dos aparelhos elétricos residenciais controláveis, que são os aparelhos de 1-7, para o caso 1.

Figura 19 – Gráfico do cronograma de funcionamento dos aparelhos elétricos controláveis resultante para o Caso 1.

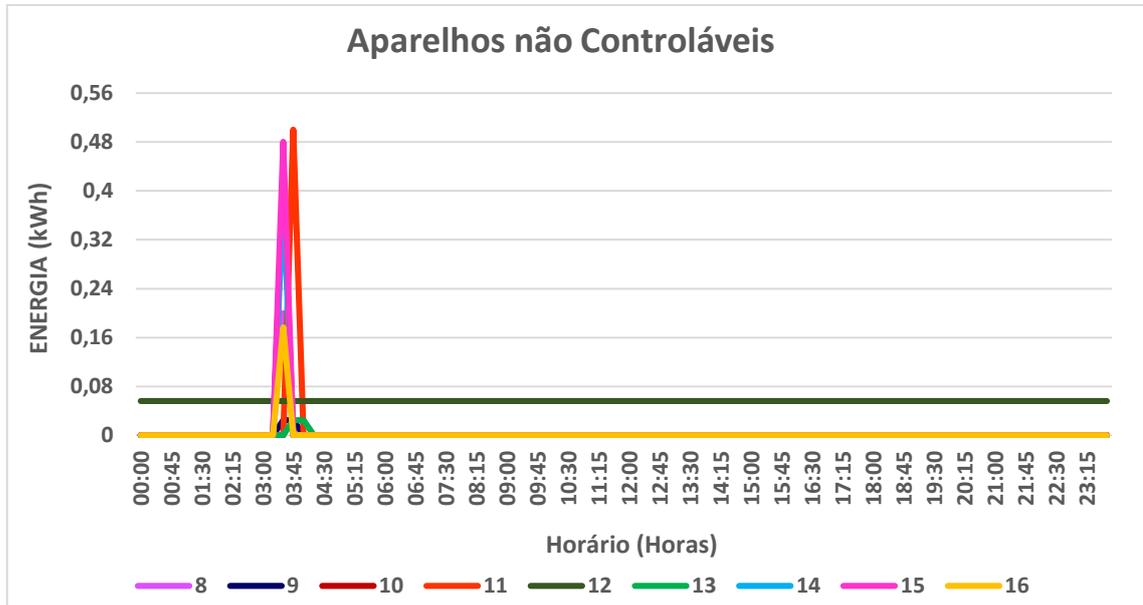


Fonte: Autora (2023).

Ao realizar a análise do comportamento desses aparelhos apresentados na Figura 19, é possível constatar que eles estão sendo atendidos conforme o comportamento do perfil da tarifa de compra, pois as cargas foram atendidas nos períodos com os menores valores de tarifa. Dentre todos os eletrodomésticos, somente dois tiveram um comportamento semelhante, são eles o 5 e o 7 (chaleira elétrica e cafeteira, respectivamente), isso pode ser explicado pelo fato de serem cargas com perfis parecidos, todos os outros aparelhos tiveram seu atendimento em momentos divergentes uns dos outros.

Na Figura 20 é apresentado o cronograma de funcionamento dos aparelhos elétricos residenciais não controláveis, são eles os aparelhos de 8 - 16, para o caso 1.

Figura 20 – Gráfico do cronograma de funcionamento dos aparelhos elétricos não controláveis resultante para o Caso 1.



Fonte: Autora (2023).

Ao realizar a análise do comportamento desses aparelhos apresentados na Figura 20, é possível constatar que eles estão sendo atendidos conforme o comportamento do perfil da tarifa de compra, pois as cargas foram atendidas nos períodos que se tem os menores valores de tarifa.

O aparelho 12 é o refrigerador e como ele deve estar ligado durante os 96 períodos, seu comportamento é constante. É possível verificar que o comportamento dos aparelhos não controláveis difere dos controláveis, no que se refere ao seu período de atendimento, os aparelhos não controláveis foram totalmente atendidos nos horários de 03h:00h as 04:30h, ou seja, foi em um período de tempo menor e de maneira mais concentrada em relação aos controláveis. É possível perceber uma grande diferença de energia necessária para atender o aparelho 9 (TV) em relação ao aparelho 11 (aspirador de pó) e isso se explica pelo fato de que a potência desses dois aparelhos é bem diferente uma da outra.

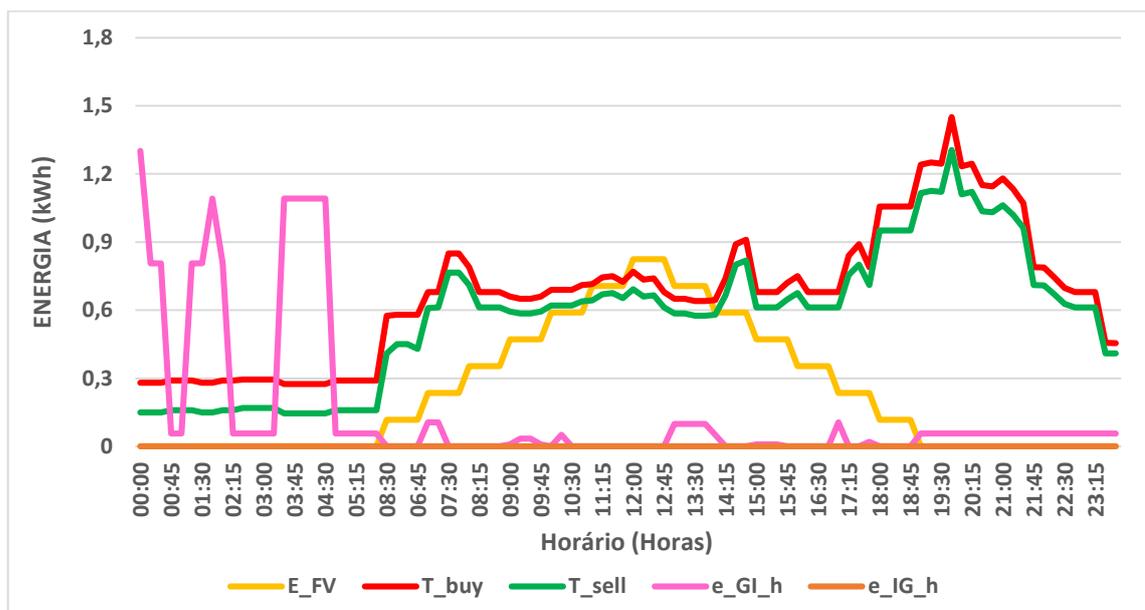
5.3.2. Caso 2

No caso 2, a residência faz uso da energia FV e da energia fornecida pela concessionária, porém, não utiliza o BESS, nem o VE, não possui a janela de tempo e não tem a possibilidade de vender energia para rede. Após a aplicação da metodologia proposta no capítulo 3, obteve-se a solução para este caso, os dados da solução do problema para este caso constam no

Apêndice B. Para realizar a análise do Caso 2 foram elaborados os gráficos contidos nas Figuras 21 a 24.

A Figura 21 apresenta o perfil de tarifa de compra e venda de energia relacionando o montante de energia comprada e vendida pela residência, a Figura 22 apresenta o perfil de carga/descarga do VE juntamente com o perfil de consumo de energia total dos aparelhos elétricos da residência em relação as tarifas de compra/venda de energia e ao perfil de energia FV, sendo o VE usado somente como uma carga. Assim como no caso 1, o caso 2 também não utiliza o BESS, logo não será apresentada a figura com seu perfil de carga/descarga do BESS. Por fim, serão mostradas nas Figura 23 e Figura 24 o cronograma de funcionamento dos aparelhos elétricos resultantes, para as cargas controláveis e não controláveis, respectivamente.

Figura 21 – Perfil de tarifas compra/venda de energia em relação energia comprada/vendida pela SH para o Caso 2.



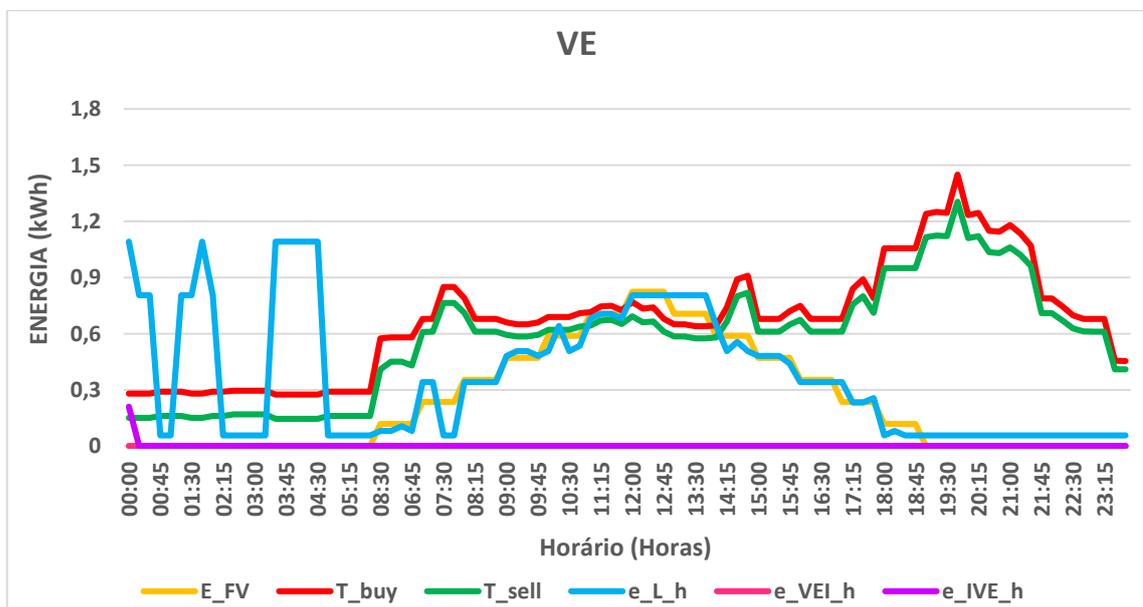
Fonte: Autora (2023).

Analisando os dados contidos na Figura 21, é possível inferir que houve uma alteração no comportamento da energia que entra na residência (e_{GI_h}) em relação ao caso 1. Como neste caso se considerou o uso da energia FV foi possível fazer com que a energia comprada da rede seja menor. Como pode ser visto no gráfico, o caso 2 teve como pico de energia comprada da rede o valor de 1,30 kW/h o que gerou uma diferença de 3,58kW/h em relação ao caso 1 que teve seu pico igual a 4,88kW/h, mostrando assim que em termos de quantidade de energia comprada da rede o caso 2 é mais eficiente do que o caso 1. Além disso, é possível verificar que a compra de energia da rede não foi feita de maneira tão concentrada como no caso 1 e sim

de maneira mais dividida entre os horários do dia, isso se deve pelo uso da energia FV que possibilitou que as cargas residenciais fossem atendidas com a energia obtida pelos painéis solares e não somente com a energia fornecida pela concessionária, o que permitiu se obter um custo otimizado de R\$ 5,23, mostrando que o Caso 2 é mais eficiente do que o Caso 1.

Apresenta-se na Figura 22 o comportamento da carga/descarga do VE e o comportamento das cargas totais em relação ao perfil de geração FV e ao perfil das tarifas de compra e de venda de energia para o Caso 2.

Figura 22 – Perfil de tarifas compra/venda de energia e geração FV em relação a carga/descarga do VE e da energia total dos aparelhos elétricos residenciais para o Caso 2.

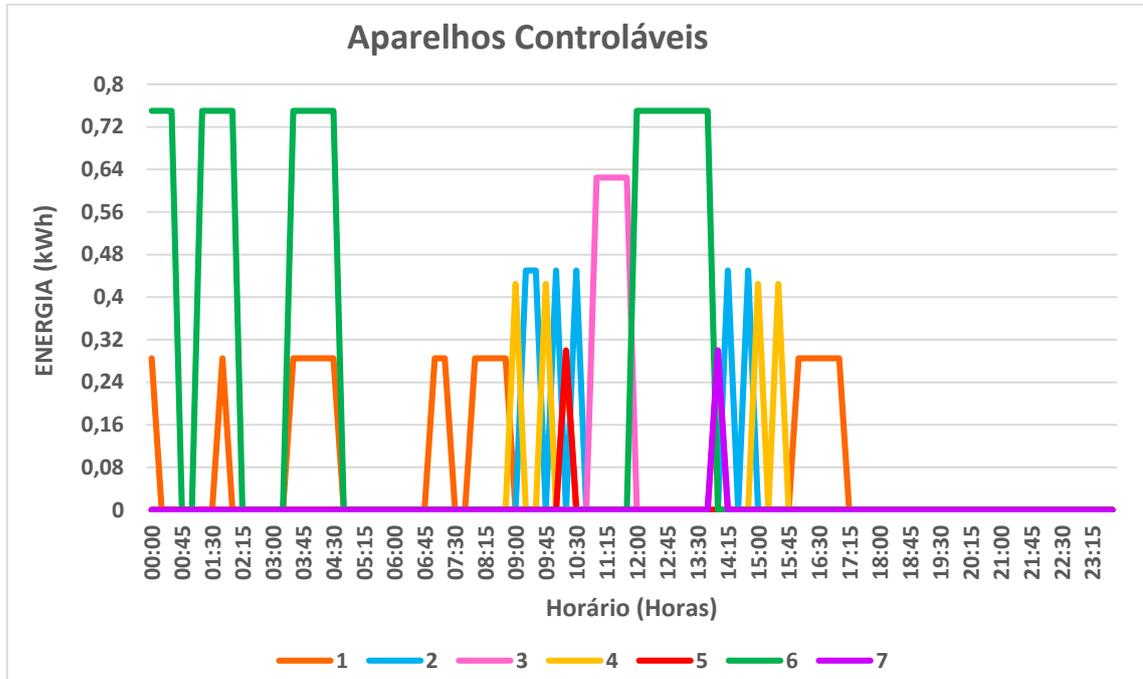


Fonte: Autora (2023).

De maneira semelhante ao Caso 1, neste caso o VE foi somente carregado e não foi descarregado, ou seja, ele foi considerado apenas como uma carga residencial e não como uma bateria, isso é explicado pelo fato de que este caso não tem um sistema armazenamento de energia, então o VE não é utilizado como uma bateria. Então, é possível verificar que a energia para o carregamento do VE (e_{VEI_h}) foi atendida completamente às 00h:00h, ou seja, quando a tarifa de compra de energia está baixa. Em relação ao perfil da energia total das cargas, é possível verificar que seu atendimento é feito principalmente em dois momentos, no momento em que a tarifa para comprar energia da rede possui seus menores valores e o outro momento é quando se tem a geração de energia FV, demonstrando assim, que a solução obtida atendeu o que foi proposto para este caso.

A Figura 23 apresenta o cronograma de funcionamento dos aparelhos elétricos residenciais controláveis, que são os aparelhos de 1 - 7, para o Caso 2.

Figura 23 – Gráfico do cronograma de funcionamento dos aparelhos elétricos controláveis resultante para o Caso 2.

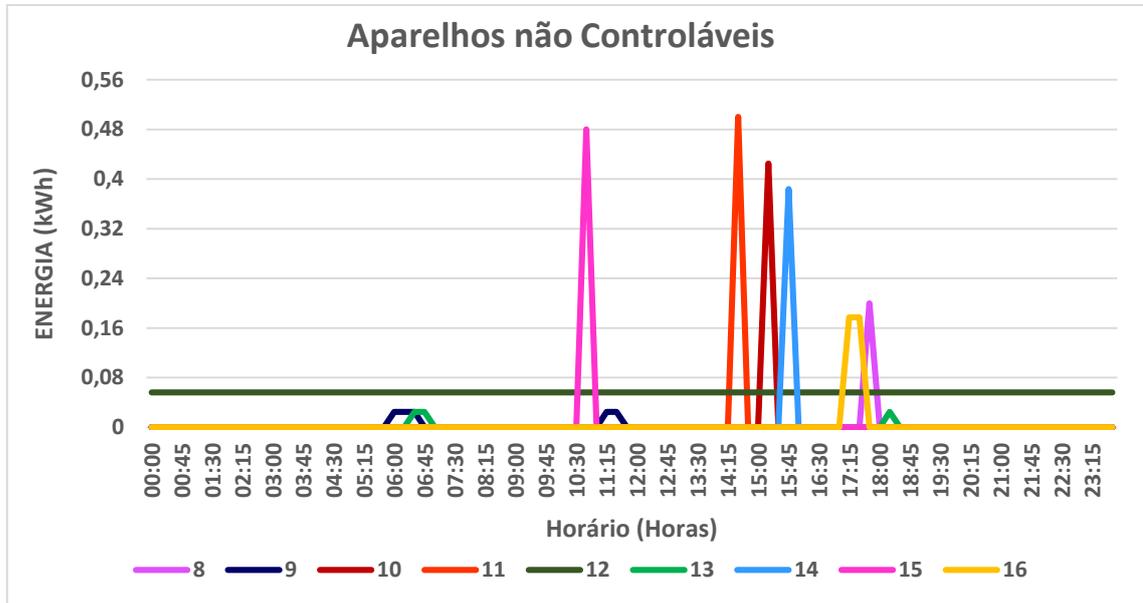


Fonte: Autora (2023).

Ao realizar a análise do comportamento dos aparelhos residenciais controláveis apresentados na Figura 23, é possível constatar que eles estão sendo atendidos conforme o comportamento do perfil da tarifa de compra e da energia PV, pois as cargas foram atendidas nos períodos com os menores valores de tarifa e no período em que se tinha energia solar. É possível verificar que houve uma alteração no comportamento das cargas no Caso 2 em relação ao comportamento dessas mesmas cargas no Caso 1. Verificou-se que todos aparelhos tiveram sua operação temporal deslocada, como por exemplo o aparelho 3 que teve seu deslocamento completo da madrugada para a faixa de horário de 11h:00h – 12h:00h.

Na Figura 24 é exibido o cronograma de funcionamento dos aparelhos elétricos residenciais não controláveis, são eles os aparelhos de 8 - 16, para o Caso 2.

Figura 24 – Gráfico do cronograma de funcionamento dos aparelhos elétricos não controláveis resultante para o Caso 2.



Fonte: Autora (2023).

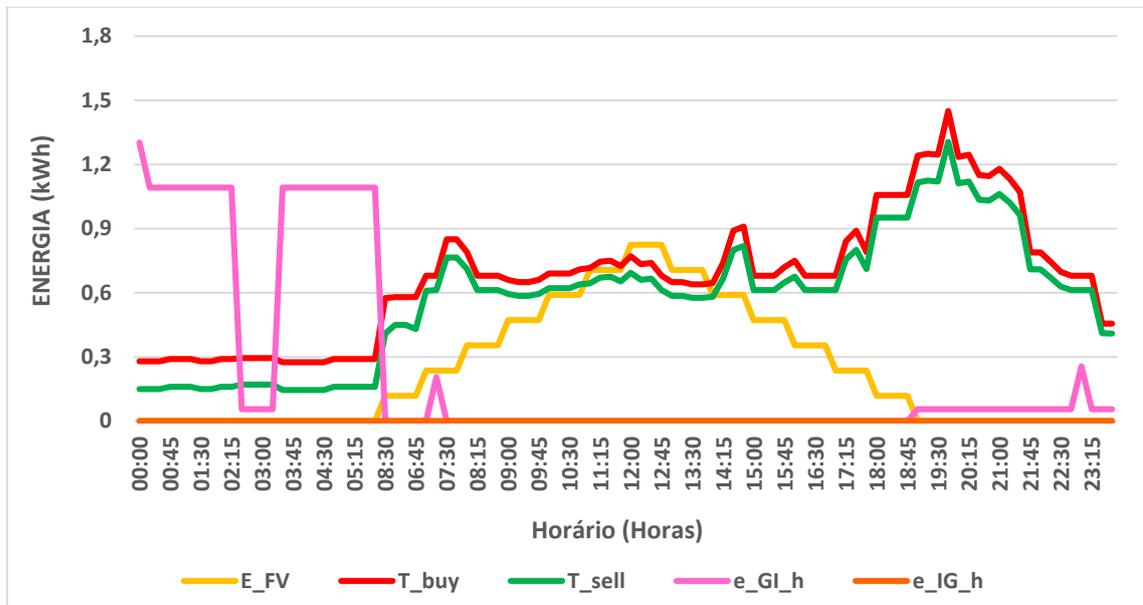
Ao analisar a Figura 24, é possível constatar que, assim como para as cargas controláveis, as cargas não controláveis estão sendo atendidas nos períodos que se tem os menores valores de tarifa de compra de energia da rede e nos períodos em que se tem a energia solar. Além disso, no gráfico é possível verificar que, com exceção do refrigerador (aparelho 12), todos os outros aparelhos tiveram sua operação temporal deslocada do período da madrugada para o período em que se começava a se obter a energia solar, totalmente diferente do caso 1 em essas cargas foram completamente atendidas no período da madrugada. Enquanto o Caso 1 teve seu pico de energia requerida para atendimento dos ANC de 0,5kWh às 03h:45h com o aparelho 11, no Caso 2 com este mesmo aparelho o pico de energia foi 0,5kWh às 14h:00h, denotando assim que o atendimento desses aparelhos foi feito principalmente nos períodos em que tinha mais energia FV. Demonstrando assim que a metodologia de solução atendeu o que foi proposto para este caso.

5.3.3. Caso 3

A residência no Caso 3 é caracterizada por utilizar a energia FV e a janela de tempo, e como nos casos anteriores, este caso não possui o BESS e não utiliza o VE como uma bateria e não pode exportar energia para a rede. A aplicação da metodologia proposta para a solução deste caso, apresentadas no Anexo C, possibilitam realizar análises dos resultados e a criar os

gráficos com os dados de solução (Figura 25 até Figura 28), que apresentam o perfil de tarifa de compra e venda de energia relacionando o montante de energia comprada e vendida pela residência sendo considerada a janela de tempo dos aparelhos (Figura 25), o perfil de carga/descarga do VE juntamente com o perfil de consumo de energia total dos aparelhos elétricos da residência em relação as tarifas de compra/venda de energia e ao perfil de energia FV (Figura 26), sendo o VE usado neste caso somente como uma carga. Como nos casos anteriores, no Caso 3 também não será apresentada a figura com o perfil de carga/descarga do BESS, pois ele não foi utilizado. Além disso, são apresentados os cronogramas de funcionamento dos aparelhos elétricos resultantes (Figura 27 e 28).

Figura 25 – Perfil de tarifas compra/venda de energia em relação energia comprada/vendida pela SH para o Caso 3.



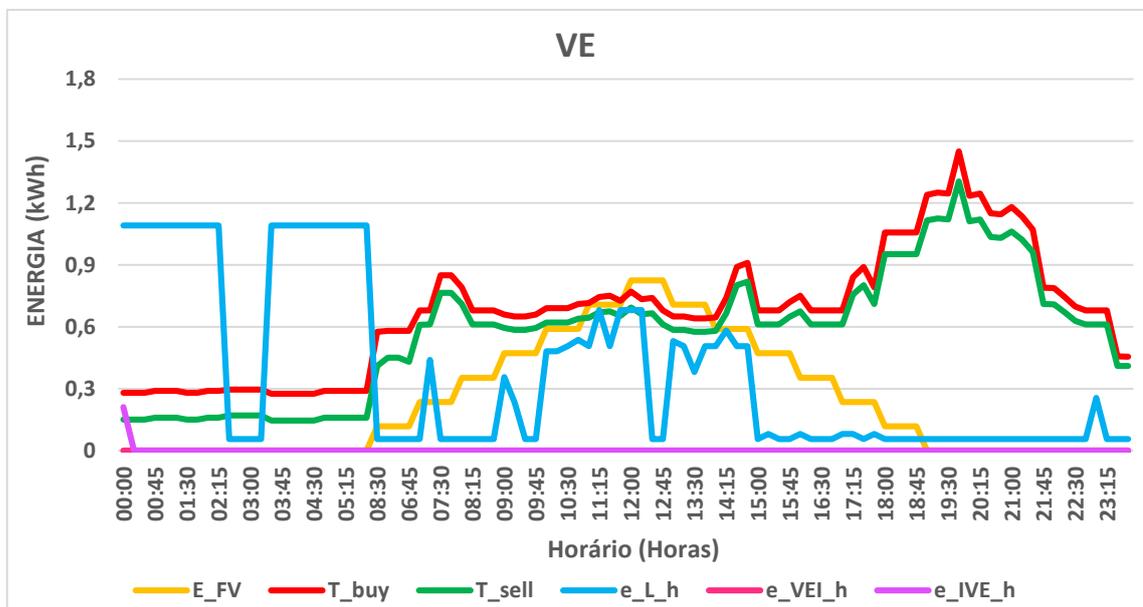
Fonte: Autora (2023).

Ao se analisar o gráfico da Figura 25, verifica-se que houve uma alteração no comportamento da energia comprada (e_GI_h) em relação ao Caso 1 e Caso 2. Isso se explica pelo fato de que neste caso foi utilizada a energia FV o que possibilitou que a quantidade de energia comprada da rede fosse menor, diferente do Caso 1, e a energia comprada obedeceu a demanda por energia conforme a restrição da janela de tempo, diferente do Caso 2. Com a análise comparativa com os dois casos anteriores, se pode afirmar que neste caso a energia comprada foi em horários mais variados do que nos anteriores, além de que foi comprada menos energia nos horários em se tinha energia FV do que no Caso 2, e neste caso se teve que comprar energia nos horários da noite para obedecer a restrição da janela de tempo. Com a caracterização

deste caso obteve um custo otimizado de R\$ 7,68, esse valor é maior do que o custo do Caso 2, mas isso já era esperado, pois o Caso 3 tinha mais uma restrição a ser obedecida, ou seja, os aparelhos deveriam ser atendidos conforme o estabelecido na janela de tempo para cada um, fazendo com que a residência não comprasse energia somente nos horários em que a tarifa tinha seu menor valor.

Na Figura 26 é mostrado o comportamento da carga/descarga do VE e a forma como as cargas totais se comportam em relação ao perfil de geração FV e ao perfil das tarifas de compra e de venda de energia para o Caso 3.

Figura 26 – Perfil de tarifas compra/venda de energia e geração FV em relação a carga/descarga do VE e da energia total dos aparelhos elétricos residenciais para o Caso 3.



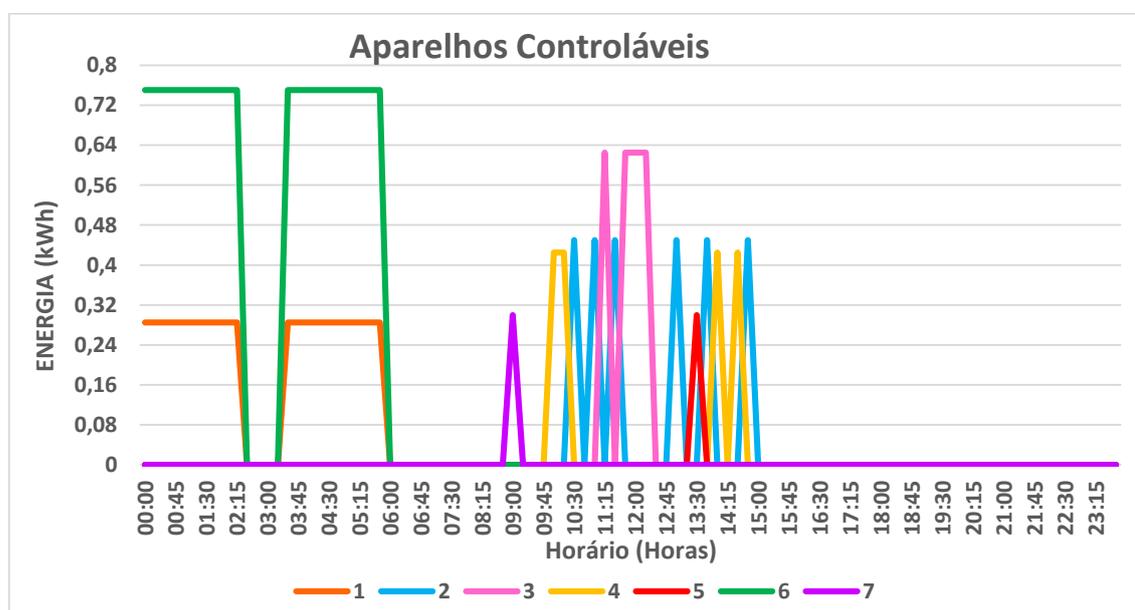
Fonte: Autora (2023).

Para realizar as análises sobre a Figura 26 ressalta-se que o VE teve somente processo de carregamento e não teve descarregamento, ou seja, o VE foi considerado apenas como uma carga residencial e não como uma bateria, isso é explicado pelo fato de que este caso não tem um sistema armazenamento de energia, então o VE não é utilizado como uma bateria. Semelhante aos casos anteriores, o VE teve seu carregamento às 00h:00h, ou seja, quando a tarifa de compra de energia está baixa. Porém, em relação a perfil da energia da carga total verifica-se que teve uma diferença no comportamento ao se comparar o Caso 3 com os Casos 1 e 2. No Caso 1 a carga total foi atendida completamente de maneira mais concentrada no período de 00h:00h – 08h:30h, no Caso 2 esse atendimento foi mais dividido durante o dia e foi utilizado o período de 24h:00h, no Caso 3 o perfil de atendimento da carga total foi está em

conformidade com a necessidade da janela de tempo estabelecida para as cargas, ou seja, as cargas foram atendidas nos períodos em que se teve o menor valor de tarifa e maior incidência solar, como no Caso 2, porém é possível perceber que, por exemplo, no horário de 23h:45h teve um pequeno pico de 0,256kWh no atendimento da carga, devido ao uso da janela de tempo, evidenciando assim, que a solução obtida atendeu o que foi proposto para este caso.

Na Figura 27 é apresentado o cronograma de funcionamento dos aparelhos elétricos residenciais controláveis para o Caso 3, que são os aparelhos de 1 – 7 apresentados no gráfico.

Figura 27 – Gráfico do cronograma de funcionamento dos aparelhos elétricos controláveis resultante para o Caso 3.

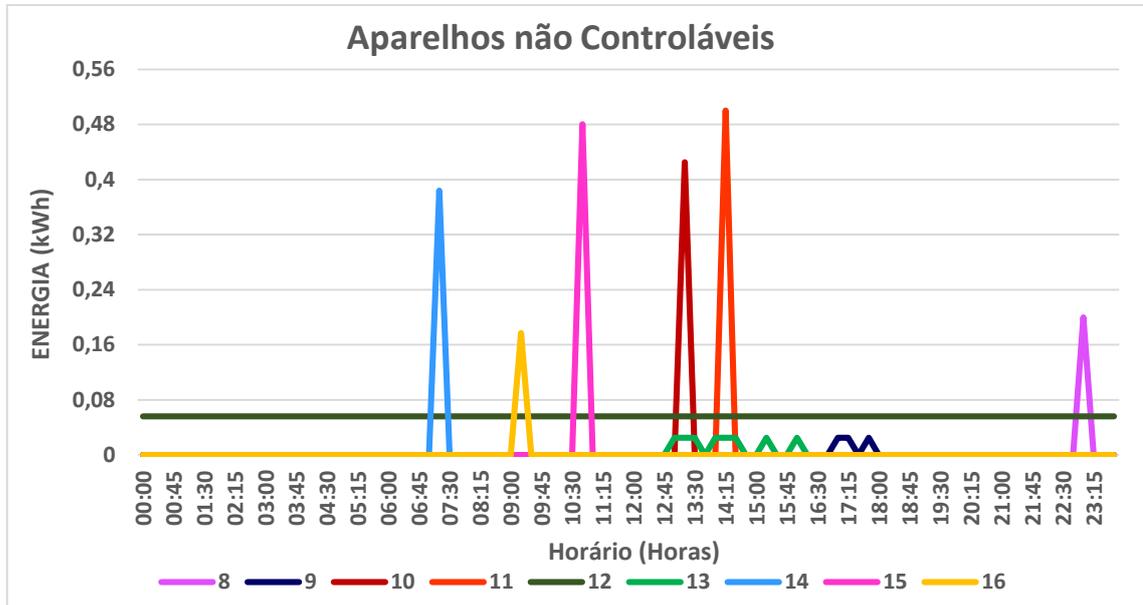


Fonte: Autora (2023).

Ao verificar o comportamento dos aparelhos residenciais controláveis apresentados na Figura 27, é possível afirmar que eles estão sendo atendidos conforme o comportamento do perfil da tarifa de compra e da energia FV, pois as cargas foram atendidas nos períodos com os menores valores de tarifa e no período em que se tinha energia FV. É possível constatar que houve uma alteração no comportamento das cargas no Caso 3 em relação ao comportamento dessas mesmas cargas nos casos anteriores. Verificou-se que todos aparelhos tiveram sua operação temporal deslocada, como por exemplo o aparelho 5 que teve seu deslocamento para a faixa de horário de 13h:00h – 13h:45h, um comportamento diferente dos casos anteriores.

O gráfico apresentado na Figura 28 contém o cronograma de funcionamento dos aparelhos elétricos residenciais não controláveis para o Caso 3, são eles os aparelhos de 8 - 16.

Figura 28 – Gráfico do cronograma de funcionamento dos aparelhos elétricos não controláveis resultante para o Caso 3.



Fonte: Autora (2023).

Ao analisar o gráfico da Figura 28, pode-se afirmar que as cargas não controláveis também estão sendo atendidas nos períodos que se tem os menores valores de tarifa de compra de energia da rede e nos períodos em que se tem a energia FV. No gráfico é possível verificar também que, com exceção do refrigerador (aparelho 12), todos os outros aparelhos tiveram sua operação temporal deslocada do período da madrugada para o período em que se começava a se obter a energia FV, totalmente diferente do Caso 1 que as cargas foram completamente atendidas no período da madrugada, já em comparação com o Caso 2 as únicas cargas que não tiveram um deslocamento temporal foram os Aparelhos 12 e 15, todos os outros tiveram um deslocamento em seu funcionamento para atender à exigência da janela de tempo. Evidenciando assim que a metodologia empregada atendeu o que foi proposto para solucionar este caso.

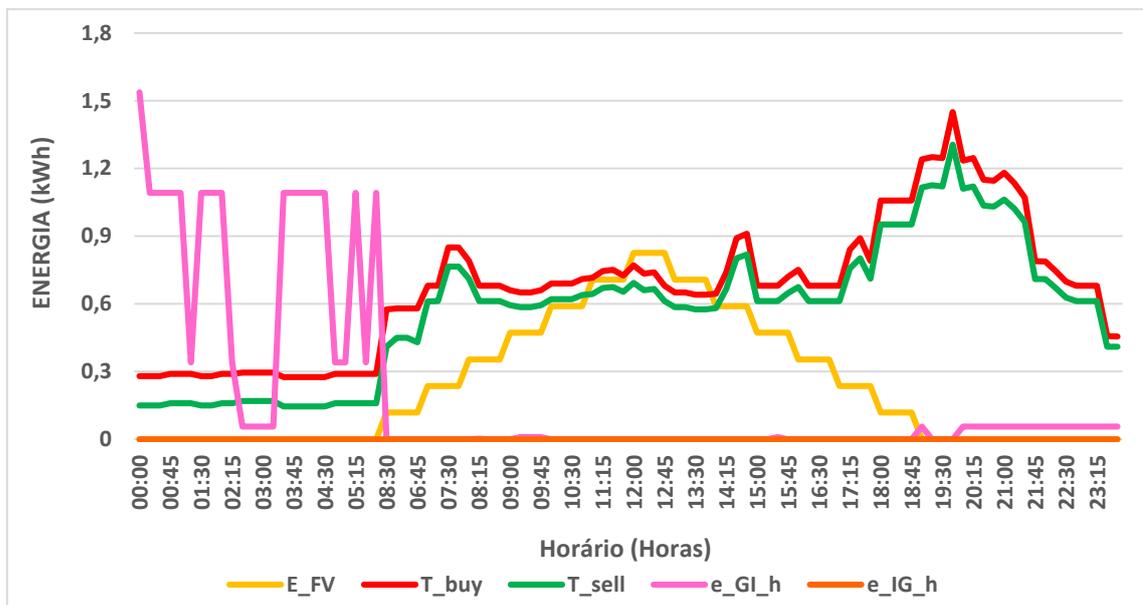
5.3.4. Caso 4

O caso 4 é o primeiro caso que passa a ter um sistema de armazenamento de energia residencial, neste caso a residência é caracterizada por utilizar a energia FV, a energia fornecida pela concessionária, utiliza o BESS e ela possui a janela de tempo para os aparelhos, porém, assim como nos anteriores, neste caso o VE atua somente como uma carga residencial e não é possível vender energia para rede. Com a aplicação das equações apresentadas no capítulo 3, tornou-se possível obter a solução para este caso, os dados da solução deste caso constam no

Apêndice D. Para realizar a análise do Caso 4 foram criados os gráficos apresentados nas Figuras 29 até a Figura 33.

Na Figura 29 é apresentado o perfil de tarifa de compra/venda de energia relacionando-as com o montante de energia comprada e vendida pela residência, a Figura 30 apresenta o perfil de carga/descarga do BESS juntamente com o perfil de consumo de energia total dos aparelhos elétricos da residência em relação as tarifas de compra/venda de energia e ao perfil de energia FV, a Figura 31 contém as informações do perfil de carga/descarga do VE e do perfil de consumo de energia total dos aparelhos elétricos da residência em relação as tarifas de compra/venda de energia e ao perfil de energia FV, sendo o VE usado somente como uma carga residencial. Por fim, serão mostradas nas Figura 32 e Figura 33 o cronograma de funcionamento dos aparelhos elétricos resultantes, para as cargas controláveis e não controláveis, respectivamente.

Figura 29 – Perfil de tarifas compra/venda de energia em relação energia comprada/vendida pela SH para o Caso 4.



Fonte: Autora (2023).

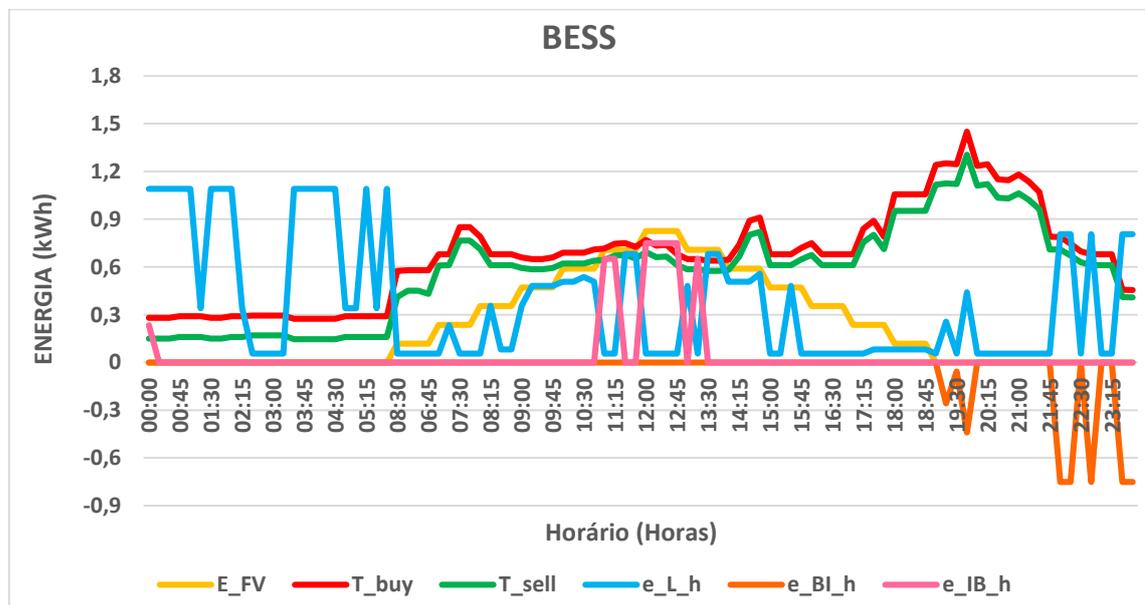
Ao observar as informações plotadas no gráfico da Figura 29, se pode constatar que a e_GI_h teve seu perfil de comportamento alterado. Como neste caso a residência pode armazenar a energia comprada e a energia gerada pelo sistema FV, verifica-se que a energia foi comprada em sua maioria no intervalo de 00h:00h – 05h:45h, ou seja, no período em que tinha o menor valor de tarifa para compra de energia da rede. Além disso, nos horários em que se tinha energia FV não houve compra de energia da rede, ou seja, a demanda de energia dos

aparelhos foi suprida com a energia gerada e armazenada do sistema FV da residência, o que foi diferente dos 3 casos anteriores.

Ao realizar uma análise comparativa com os três casos anteriores, é possível afirmar que o Caso 4 teve como pico de energia comprada da rede o valor aproximado de 1,54 kW/h, que foi menor que no Caso 1 (aproximadamente 4,88kW/h) e um pouco maior que nos casos 2 e 3 (aproximadamente 1,30 kW/h). A solução otimizada para este problema obteve um custo total igual a R\$ 6,19, sendo o valor maior do que do Caso 2 e menor do que nos Casos 1 e 3, mas isso era esperado, pois como no caso 2 não foi considerada a restrição de janela de tempo. Mas considerando todas as restrições apresentadas até este momento, o Caso 4 pode ser considerado como o mais eficiente, pois atende todas as restrições.

O gráfico apresentado na Figura 30 exibe o comportamento da carga/descarga do BESS e o comportamento das cargas totais em relação ao perfil de geração FV e ao perfil das tarifas de compra e de venda de energia para o Caso 4. Vale frisar que este é o primeiro caso em que considerou o uso do BESS na residência.

Figura 30 – Perfil de tarifas compra/venda de energia e geração FV em relação a carga/descarga do BESS e da energia total dos aparelhos elétricos residenciais para o Caso 4.



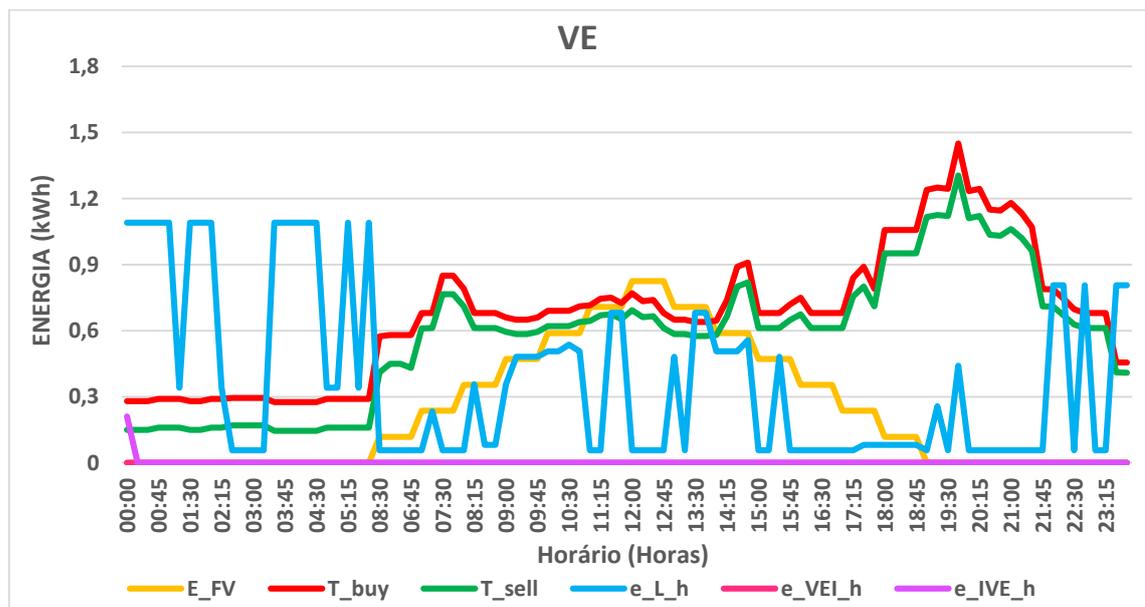
Fonte: Autora (2023).

Com a análise das informações contidas no gráfico da Figura 30, se pode afirmar que o proposto para este caso foi atendido, pois teve o carregamento e descarregamento do BESS, observando a variável e_IB_h verifica-se que o carregamento foi feito nos momentos em que se teve a geração de energia FV e quando se tem os menores valores da tarifa de compra de

energia e o descarregamento é feito quando os aparelhos necessitam serem atendidos e quando a tarifa de compra de energia é maior. Demonstrando que o BESS foi incluído e que seu uso foi feito de forma correta. Em relação ao perfil da energia total das cargas, é possível verificar que seu atendimento é feito principalmente em três momentos, no momento em que a tarifa para comprar energia da rede possui seus valores mais baixos, no momento em que se tem a geração de energia FV e o terceiro momento é quando se tem o descarregamento da energia armazenada na bateria (e_{BI_h}), ou seja, a e_{BI_h} atende à demanda dos aparelhos quando lhe é pedido.

A Figura 31 apresenta dos dados do comportamento da carga/descarga do VE e do comportamento das cargas totais em relação ao perfil de geração FV e ao perfil das tarifas de compra/venda de energia para o Caso 4.

Figura 31 – Perfil de tarifas compra/venda de energia e geração FV em relação a carga/descarga do VE e da energia total dos aparelhos elétricos residenciais para o Caso 4.

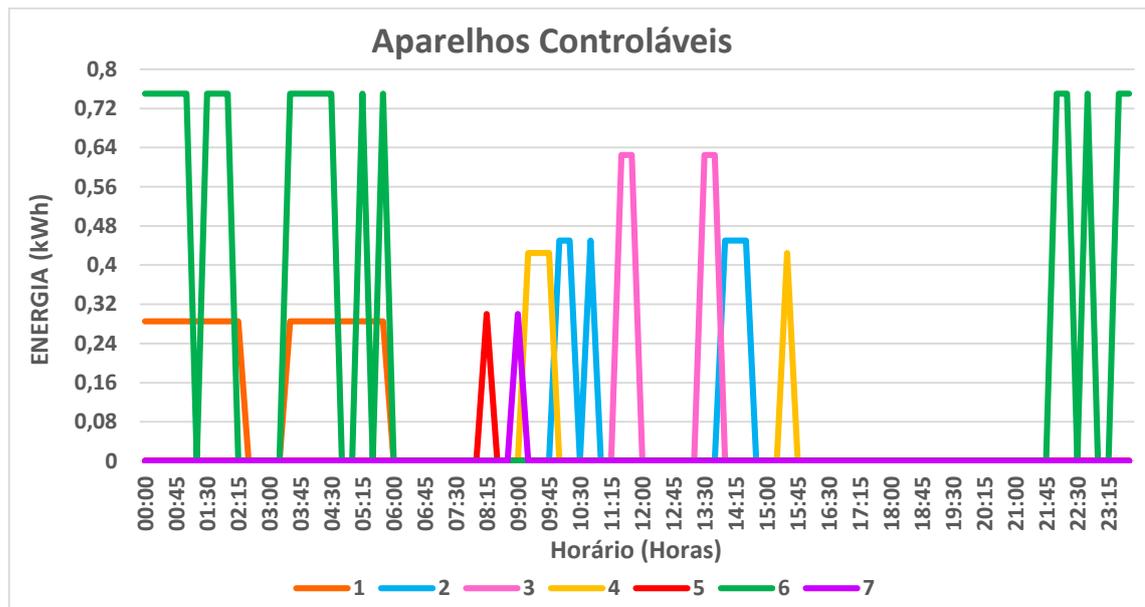


Fonte: Autora (2023).

De maneira semelhante aos casos anteriormente apresentados, o VE foi somente carregado e não foi descarregado, ou seja, ele foi considerado somente como uma carga residencial e não como uma bateria que compõe o sistema de armazenamento de energia residencial. Então, é possível verificar que a e_{VEI_h} foi completamente atendida às 00h:00h. O perfil da energia total das cargas se comportou da mesma forma que foi apresentado anteriormente na Figura 30.

O gráfico apresentado na Figura 32 mostra o cronograma de funcionamento dos aparelhos elétricos residenciais controláveis para o Caso 4, que são os aparelhos de 1 – 7 apresentados no gráfico.

Figura 32 – Gráfico do cronograma de funcionamento dos aparelhos elétricos controláveis resultante para o Caso 4.

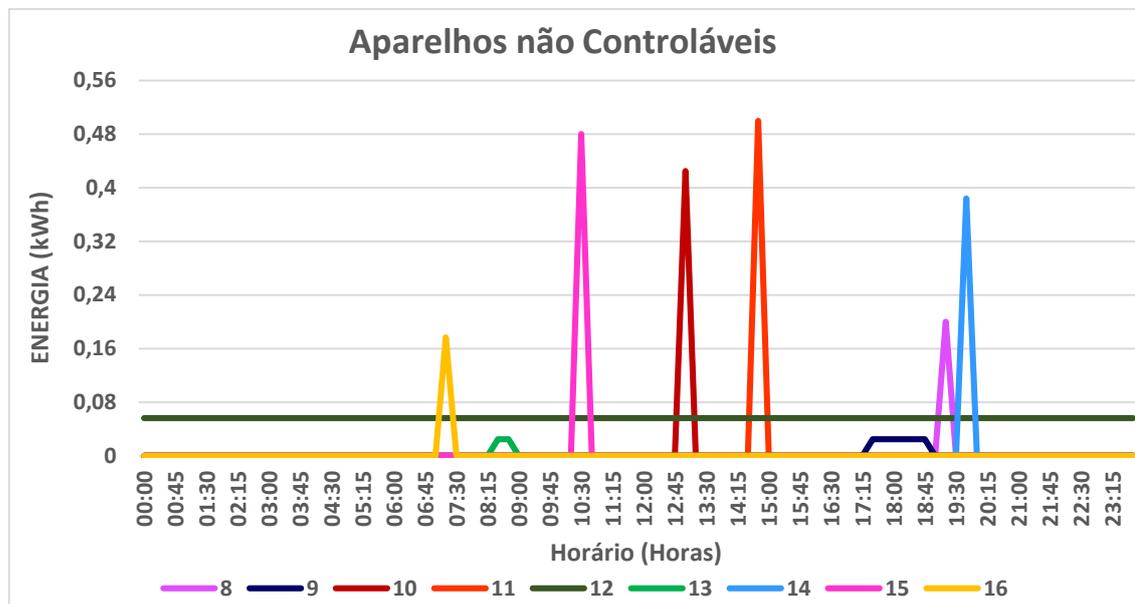


Fonte: Autora (2023).

A análise do comportamento dos aparelhos residenciais controláveis apresentados na Figura 23, mostra que eles estão sendo atendidos conforme o comportamento do perfil da tarifa de compra, da geração de energia FV, conforme o comportamento do BESS e principalmente conforme a janela de tempo de cada um dos aparelhos. Observa-se que houveram alterações no comportamento das cargas controláveis no Caso 4 em relação ao comportamento dessas mesmas cargas nos outros 3 casos. Verificou-se que todos aparelhos tiveram sua operação temporal deslocada ou modificada em algum momento, como por exemplo o aparelho 5 que teve um seu atendimento dentro da faixa estabelecida pela janela de tempo, porém foi atendido as 08h:15h, que é um horário completamente diferente dos horários que esta mesma carga foi atendida nos casos anteriores.

Na Figura 23 é apresentado o gráfico do cronograma de funcionamento dos aparelhos elétricos residenciais não controláveis para o Caso 4, são eles os aparelhos de 8 – 16.

Figura 33 – Gráfico do cronograma de funcionamento dos aparelhos elétricos não controláveis resultante para o Caso 4.



Fonte: Autora (2023).

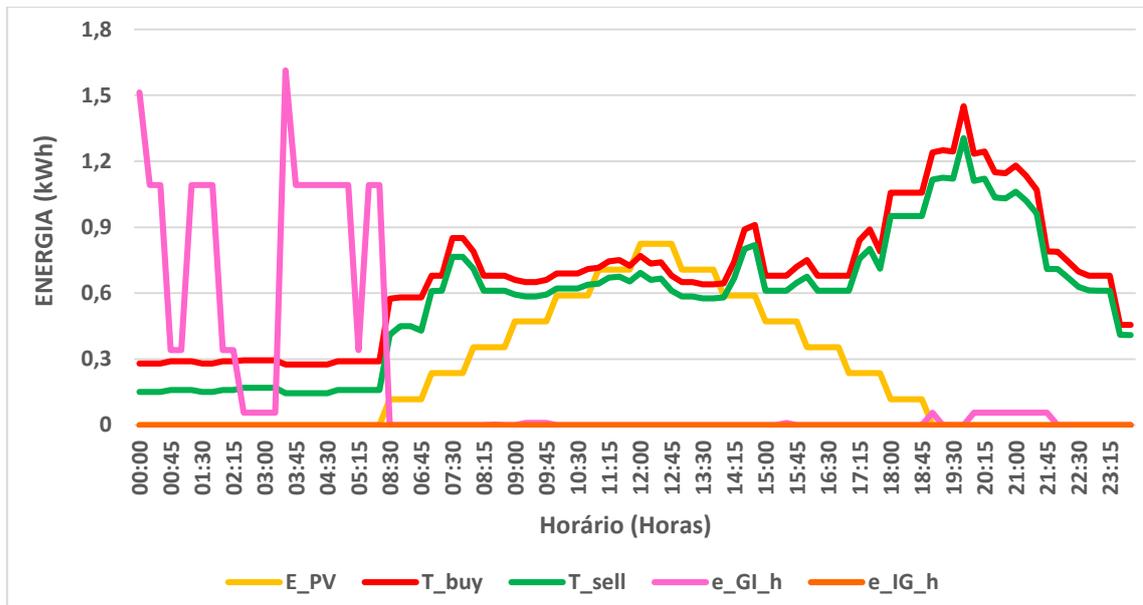
Ao analisar a Figura 33, é possível constatar que as cargas não controláveis estão sendo atendidas conforme sua respectiva janela de tempo, e estão dentro dos períodos que se tem os menores valores de tarifa de compra de energia da rede, que se tem geração de energia FV e nos momentos em se tem energia armazenada sendo descarregada pelo BESS. Como também, verificar-se que, com exceção do refrigerador (Aparelho 12), pois ele deve estar sempre ligado, todos os outros aparelhos tiveram sua operação temporal deslocada do período da madrugada para o período em que se começava a se obter a energia solar, totalmente diferente do Caso 1 em que essas cargas foram completamente atendidas no período da madrugada. Com fazendo uma análise comparativa entre os Casos 2, 3 e 4, observa-se que o único aparelho que teve um comportamento semelhante nos três casos foi o aparelho 15 (Ferro de Passar), as outras cargas tiveram seu funcionamento deslocado conforme o estabelecido pelo algoritmo para se atender a todas as restrições estabelecidas. Demonstrando assim que a metodologia de solução atendeu o que foi proposto para este caso.

5.3.5. Caso 5

No Caso 5 a residência é caracterizada por utilizar a geração de energia FV, por respeitar a janela de tempo e tem um sistema de armazenamento de energia que é composto pelo BESS e pelo VE, ou seja, neste caso o VE é utilizado tanto como carga quanto como bateria, porém é

feita a exclusão da possibilidade de exportação de energia para a rede. Os dados de solução obtidos com a aplicação da metodologia proposta para este caso são apresentados no Anexo E. Com esses dados foi possível realizar a criação de alguns gráficos para representar a solução encontrada, a Figura 34 apresenta o perfil de tarifa de compra e venda de energia relacionando o montante de energia comprada e vendida pela residência, nas Figuras 35 e 36 estão contidas as informações do perfil de carga/descarga do BESS e do VE, e é mostrado o perfil de consumo de energia total dos aparelhos elétricos da residência em relação as tarifas de compra/venda de energia e ao perfil de energia FV. Por fim, nas Figuras 27 e 28 são apresentados os gráficos com os cronogramas de funcionamento dos aparelhos elétricos resultantes.

Figura 34 – Perfil de tarifas compra/venda de energia em relação energia comprada/vendida pela SH para o Caso 5.



Fonte: Autora (2023).

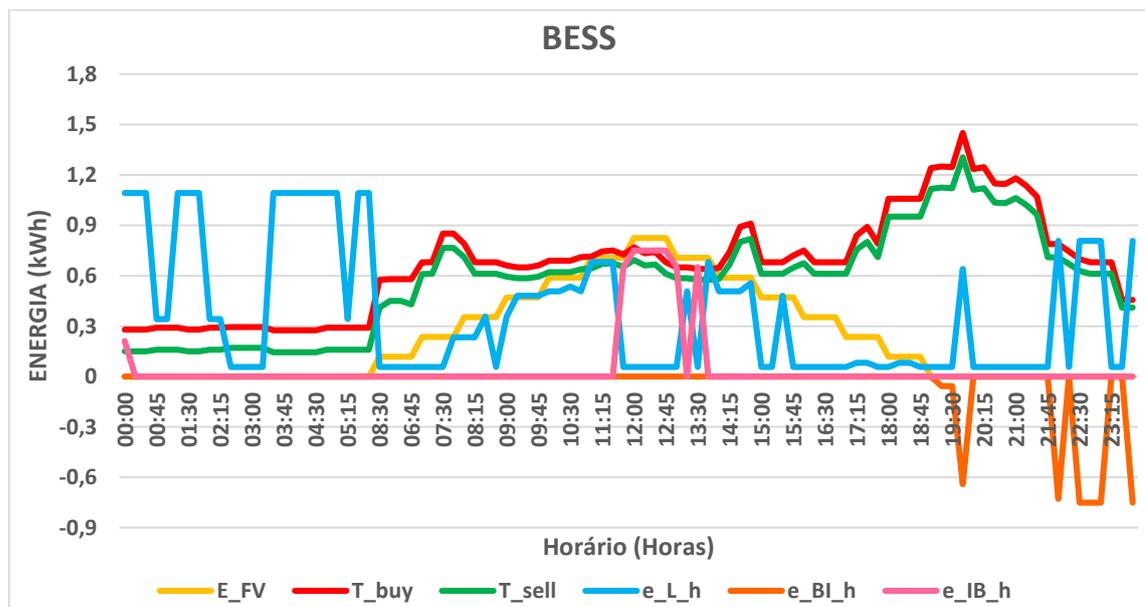
Ao analisar as informações contidas no gráfico da Figura 34, é possível constatar que, de maneira geral, assim como os casos 3 e 4 em que se era possível gerar e armazenar energia FV, a compra de energia se deu em sua maioria nos períodos em que não se tinha energia FV e nos momentos em que os valores da tarifa de compra eram menores. Ao se comparar o perfil de comportamento da e_GI_h deste caso com os casos anteriores, verifica-se que o Caso 5 obteve o segundo maior valor de pico de energia comprada (aproximadamente 1,61kWh) ficando atrás somente do Caso 1 (aproximadamente 4,88kW/h), isso pode ser explicado pelo

fato de este caso ter uma maior capacidade para armazenar por utilizar o BESS e o VE em seu sistema de armazenamento de energia elétrica.

O custo total obtido com a otimização solução para este caso foi de R\$ 6,03, sendo o valor maior do que do Caso 2 e menor do que nos Casos 1, 3 e 4, isso é explicado porque no caso 2 não foi considerada a restrição de janela de tempo e nos casos 3, 4 e 5 ela foi considerada. Mas considerando todas as restrições apresentadas até este momento, o Caso 5 pode ser considerado como o mais eficiente, pois atende todas as restrições e isso se deve ao fato de que neste caso se tinha uma maior capacidade de armazenar energia.

A Figura 35 apresenta o comportamento da carga/descarga do BESS e a maneira que as cargas totais se comportam em relação ao perfil de geração FV e ao perfil das tarifas de compra e de venda de energia para o Caso 5.

Figura 35 – Perfil de tarifas compra/venda de energia e geração FV em relação a carga/descarga do BESS e da energia total dos aparelhos elétricos residenciais para o Caso 5.



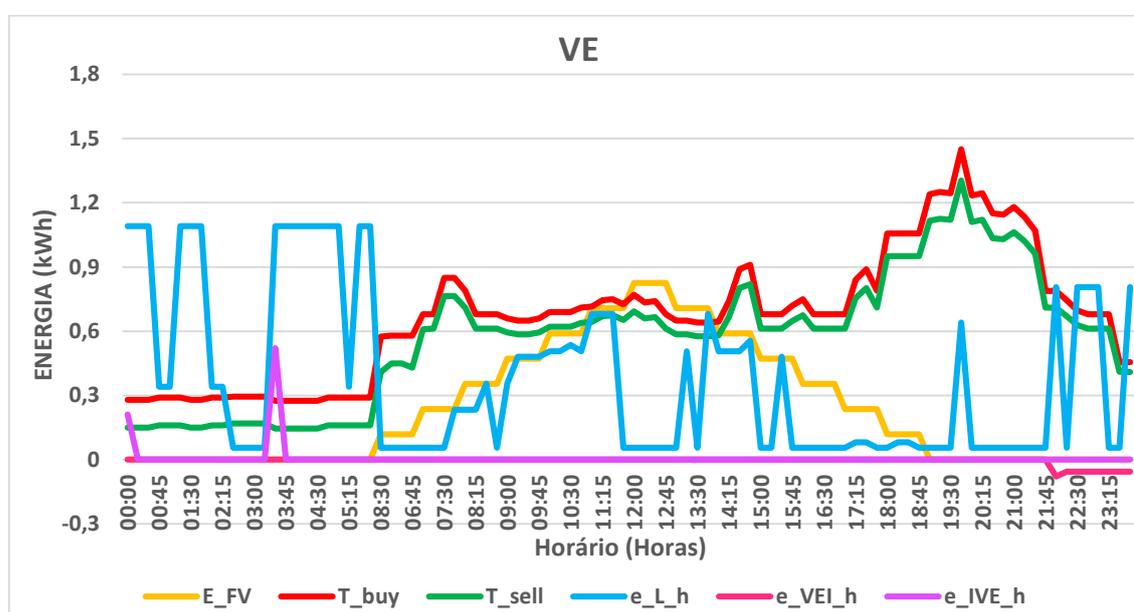
Fonte: Autora (2023).

As informações apresentadas na Figura 35 possibilitam afirmar que foi feito o carregamento e descarregamento do BESS. Ao se observar a variável e_IB_h verifica-se que o carregamento foi feito nos momentos em que se teve a geração de energia FV e quando se tem os menores valores da tarifa de compra de energia e o descarregamento é feito quando a demanda por energia dos aparelhos precisa ser atendida e quando a tarifa de compra de energia é maior. Demonstrando que o BESS foi incluído e que seu uso foi feito da forma correta. Em relação ao perfil da energia total das cargas, é possível constatar que seu atendimento é feito

principalmente em três ocasiões, primeiramente quando a tarifa para comprar energia da rede possui seus valores mais baixos, posteriormente quando se tem a geração de energia FV e por fim, quando se tem a descarga de energia do BESS, ou seja, quando a e_BI_h atende à demanda dos aparelhos.

Na Figura 36 é mostrado um gráfico com o comportamento da carga/descarga do VE, bem como, a forma que as cargas totais se comportam em relação ao perfil de geração FV e ao perfil das tarifas de compra e de venda de energia para o Caso 5.

Figura 36 – Perfil de tarifas compra/venda de energia e geração FV em relação a carga/descarga do VE e da energia total dos aparelhos elétricos residenciais para o Caso 5.

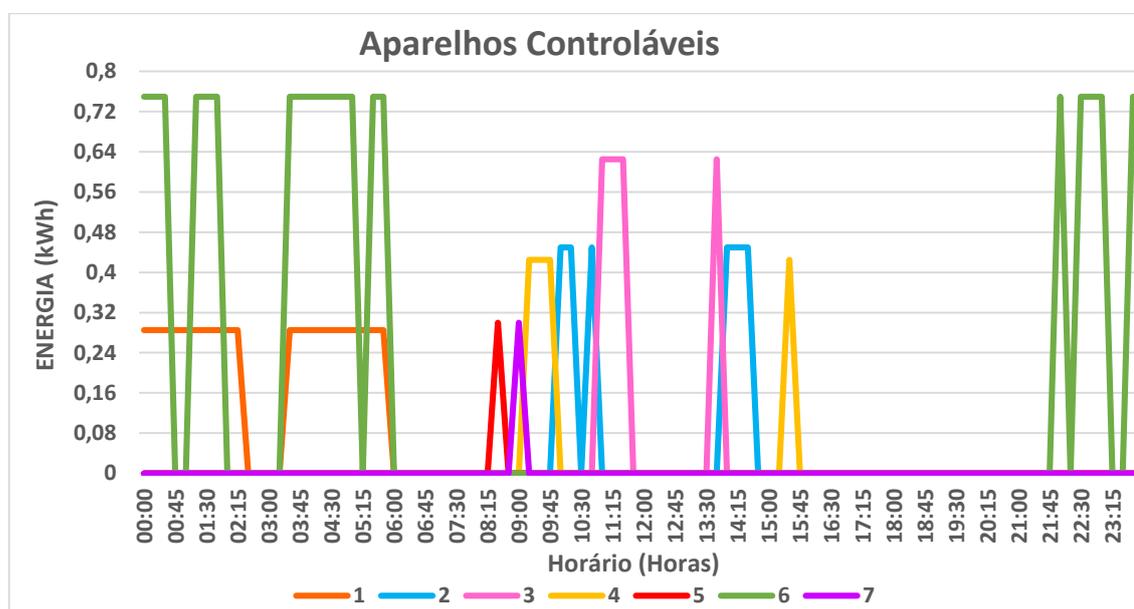


Fonte: Autora (2023).

De maneira diferente do que aconteceu nos casos anteriores, no Caso 5 o VE não tem o comportamento apenas de uma carga residencial, mas se comporta também como uma bateria nos momentos que a programação exigir. Com a análise gráfica é possível verificar que a e_IVE_h foi atendido em mais de um horário que foi às 00h:00h e às 03h:30h, denotando que ele precisou de mais energia do que nos casos anteriores pelo fato de ser utilizado também como uma bateria, além disso, a energia armazenada no VE foi descarregada para atender a demanda de energia os aparelhos elétricos residências no período de 22h:00h – 23h:45h, denotando que o VE foi utilizado como bateria e como carga residencial. O perfil da energia total das cargas se comportou da mesma forma que foi apresentado anteriormente na Figura 35.

O gráfico apresentado na Figura 37 exibe o cronograma de funcionamento dos aparelhos elétricos residenciais controláveis para o Caso 5.

Figura 37 – Gráfico do cronograma de funcionamento dos aparelhos elétricos controláveis resultantes para o Caso 5.

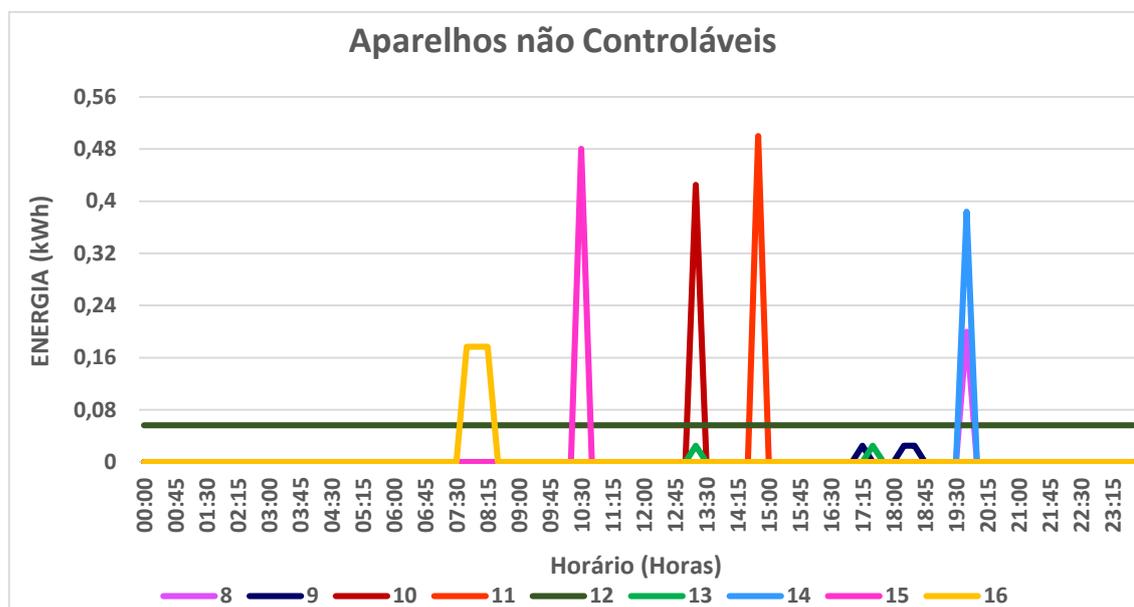


Fonte: Autora (2023).

Ao verificar o comportamento dos aparelhos residenciais controláveis apresentados na Figura 37, é possível afirmar que eles estão sendo atendidos conforme o comportamento do perfil da tarifa de compra, da geração de energia FV e por conseguinte está em conformidade com o descarregamento do BESS e VE. Ao se realizar uma análise comparativa entre os casos 1, 2, 3 e 4 é possível verificar uma diferença no comportamento das cargas do Caso 5. No atual caso sofreram um deslocamento mais semelhante ao Caso 4 e diferente dos outros casos, isso pode ser explicado pelo fato de que os dois casos utilizam o BESS, porém no Caso 5 é possível ver algumas alterações no comportamento dos aparelhos, como por exemplo o aparelho 3 que teve atendimento nos horários de 11h:30h – 11h:45h / 13h:30 – 13:45h no Caso 4 e no Caso 5 esses horários modificaram para 11h:00 – 11h:30h / 13h:45h, o que mostra que o atendimento dos aparelhos sofreu um pequeno deslocamento.

A Figura 38 apresenta o gráfico do cronograma de funcionamento dos aparelhos elétricos residenciais não controláveis para o Caso 5.

Figura 38 – Gráfico do cronograma de funcionamento dos aparelhos elétricos não controláveis resultantes para o Caso 5.



Fonte: Autora (2023).

Analisando o gráfico da Figura 38, é possível afirmar que as cargas não controláveis também estão sendo atendidas nos períodos que se tem os menores valores de tarifa de compra de energia da rede e nos períodos em que se tem a energia FV e que se tem a disponibilidade de energia armazenada no BESS e no FV. Com a visualização gráfica é possível verificar também que, com exceção do refrigerador (aparelho 12) deve estar ligado durante os 96 períodos, ao relacionar este caso com o Caso 1 todos os aparelhos tiveram sua operação temporal deslocada do período da madrugada para o período em que se começa a ter a geração de energia FV. Ao se comparar este caso com os casos 2 e 3 é possível observar que somente o aparelho 15 teve o comportamento semelhante nos três casos, porém ao se comparar com o Caso 4 verifica-se que houve um comportamento semelhante nos aparelhos 10, 11, 14 e 15, os outros tiveram um deslocamento em seu funcionamento que foi motivado pelo uso do VE como uma bateria.

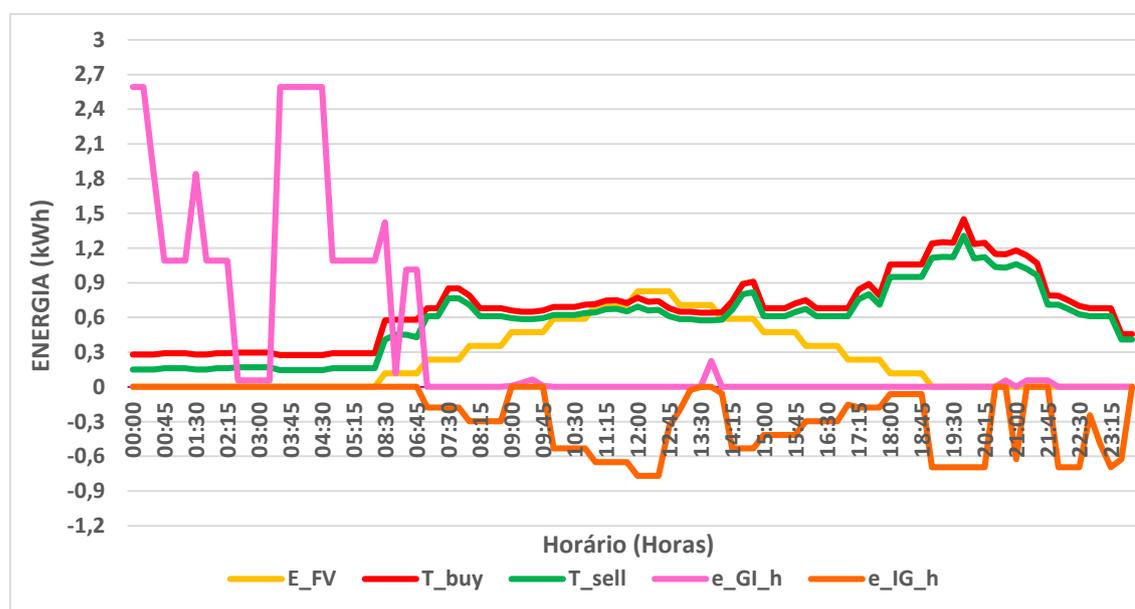
5.3.6. Caso 6

O caso 6 é o único caso que tem a possibilidade de exportar (vender) energia para a concessionária, neste caso a residência é caracterizada por possuir a janela de tempo para os aparelhos, utilizar a energia gerada pelo sistema FV, comprar energia fornecida pela concessionária e por ter um sistema de armazenamento de energia residencial composto pelo

BESS e pelo VE. Com a aplicação das equações apresentadas no capítulo 3, tornou-se possível obter a solução para este caso, os dados da solução encontrada constam no Apêndice F. Para realizar a análise dos resultados obtidos no Caso 6, foi feita a plotagem dos gráficos contidos nas Figura 39 – 43.

A Figura 39 contém os dados referentes ao perfil de tarifa de compra/venda de energia relacionando-as com o montante de energia comprada e vendida pela residência, a Figura 40 apresenta o perfil de carga/descarga do BESS em conjunto com o perfil de consumo de energia total dos aparelhos elétricos da residência em relação as tarifas de compra/venda de energia e ao perfil de energia FV, a Figura 41 que possui as informações do perfil de carga/descarga do VE e do perfil de consumo de energia total dos aparelhos elétricos da residência em relação as tarifas de compra/venda de energia e ao perfil de energia FV. Por fim, serão mostradas nas Figura 42 e Figura 43 o cronograma de funcionamento dos aparelhos elétricos resultantes, para as cargas controláveis e não controláveis, respectivamente.

Figura 39 – Perfil de tarifas compra/venda de energia em relação energia comprada/vendida pela SH para o Caso 6.



Fonte: Autora (2023).

Analisando as informações contidas no gráfico da Figura 39 é possível constatar que a e_GI_h teve seu perfil de comportamento alterado ao se comparar com os outros casos. Como neste Caso a residência possui Recursos Energéticos Distribuídos (RED) citados no Capítulo 3. Logo, a residência pode comprar energia da concessionária, pode gerar energia elétrica com a utilização do sistema FV, pode armazenar energia com a utilização do BESS e do VE e,

diferente dos cinco casos anteriores, ela tem a possibilidade de vender a energia para a concessionária. Então, além da linha correspondente ao perfil da e_{GI_h} o gráfico também apresenta a linha correspondente ao perfil da e_{IG_h} (energia vendida para rede).

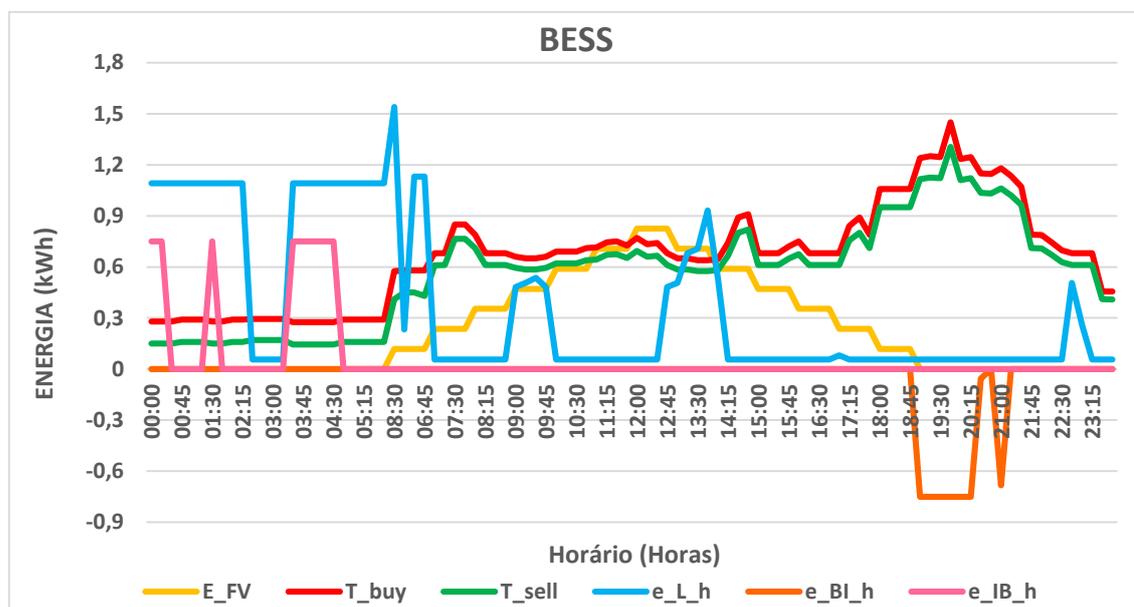
Realizando uma análise comparativa entre os Casos 1, 2, 3, 4 e 5 com o Caso 6, infere-se que o comportamento da e_{GI_h} foi diferente em todos os casos. No Caso 6 teve o segundo maior pico de energia comprada da concessionária com um valor aproximado de 2,59kWh, ficando atrás somente do Caso 1 (aproximadamente 4,88kW/h), o que compreensível pois no Caso 6 é possível armazenar energia nos períodos de menor valor de tarifa de compra e vender a energia armazenada, tanto a energia comprada quando a energia gerada pelo sistema FV, nos momentos em que a tarifa de compra está alta. Além disso, verifica-se que a e_{GI_h} teve um valor máximo de 0,22kWh durante o período em que se tinha geração de energia FV para evitar de comprar uma maior quantidade de energia nos momentos de pico de energia da rede, ou seja, quando é mais caro comprar eletricidade da rede.

Como foi dito anteriormente, este Caso possui a possibilidade de exportar energia para a rede, então o gráfico mostra o comportamento do e_{IG_h} e é possível constatar que a energia é vendida nos momentos em que a tarifa de compra de energia esta mais alta e nos momentos em que a residência consegue gerar energia elétrica renovável, verifica-se a partir das 07h:00 a residência inicia a venda de energia e finaliza aproximadamente as 23h:30h , sendo que durante esse intervalo existem alguns momentos em que não houve a venda de energia, por não ser viável vender a energia armazenada ou essa energia foi utilizada para atender os aparelhos.

A solução otimizada que foi encontrada para o Caso 6 foi a mais eficiente, pois diferente dos outros casos apresentados ela não gerou custo a residência, muito pelo contrário, neste caso se conseguiu um lucro de R\$ 5,84, ou seja, resultou em uma redução de 147,742% de custos de eletricidade. O que denota a validação da metodologia aplicada neste caso, onde se buscou encontrar o menor custo para a realização de uma programação dos aparelhos residências em uma *Smart Home* que utiliza os RED.

O gráfico apresentado na Figura 40 expõe o comportamento da carga/descarga do BESS em conjunto com o comportamento das cargas totais em relação ao perfil de geração FV e ao perfil das tarifas de compra e de venda de energia para o Caso 6.

Figura 40 – Perfil de tarifas compra/venda de energia e geração FV em relação a carga/descarga do BESS e da energia total dos aparelhos elétricos residenciais para o Caso 6.

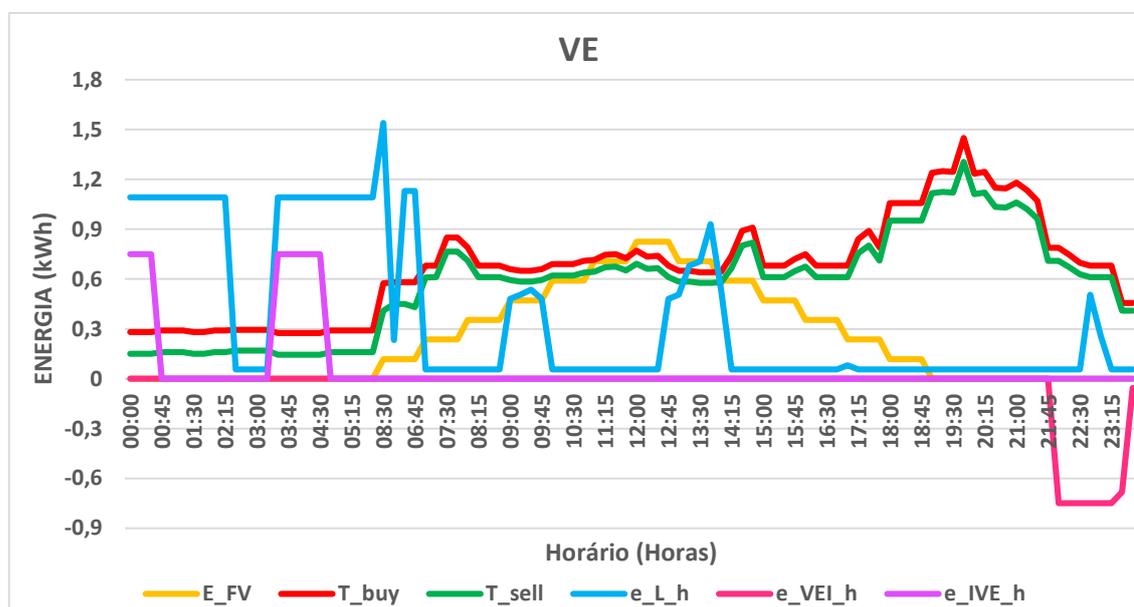


Fonte: Autora (2023).

Com as informações contidas no gráfico da Figura 40 é possível afirmar que o Caso 6 tanto e_{IB_h} quanto o e_{BI_h} tiveram um comportamento diferente do que foi visto nos Casos 4 e 5. Como se pode ver, o carregamento do BESS foi feito inteiramente no período da madrugada que é quando se tem o menor valor de tarifa, enquanto que nos casos anteriores a maior parte do carregamento foi realizado nos períodos em que se tinha geração de energia renovável, quanto ao descarregamento também é possível verificar uma mudança de comportamento, enquanto nos casos anteriores se tinha a descarga em mais de um intervalo de horário, este caso teve sua descarga feita em somente um intervalo de tempo que foi de 19h:00h – 20h:30h. Em relação ao perfil da energia total das cargas, é possível verificar que seu comportamento também é diferente dos casos anteriores em que se tem o uso do BESS, neste caso a frequência de energia para as cargas foram menores, porém, foram mais elevados. Entretanto, seu atendimento foi feito principalmente em três momentos, como no Caso 5, no momento em que a tarifa para comprar energia da rede possui seus valores mais baixos, no momento é quando se tem a geração de energia FV e o terceiro momento é quando se tem o descarregamento da energia armazenada no BESS.

Na Figura 41 é exibido os dados do comportamento da carga/descarga do VE e do comportamento das cargas totais em relação ao perfil de geração FV e ao perfil das tarifas de compra/venda de energia para o Caso 6.

Figura 41 – Perfil de tarifas compra/venda de energia e geração FV em relação a carga/descarga do VE e da energia total dos aparelhos elétricos residenciais para o Caso 6.

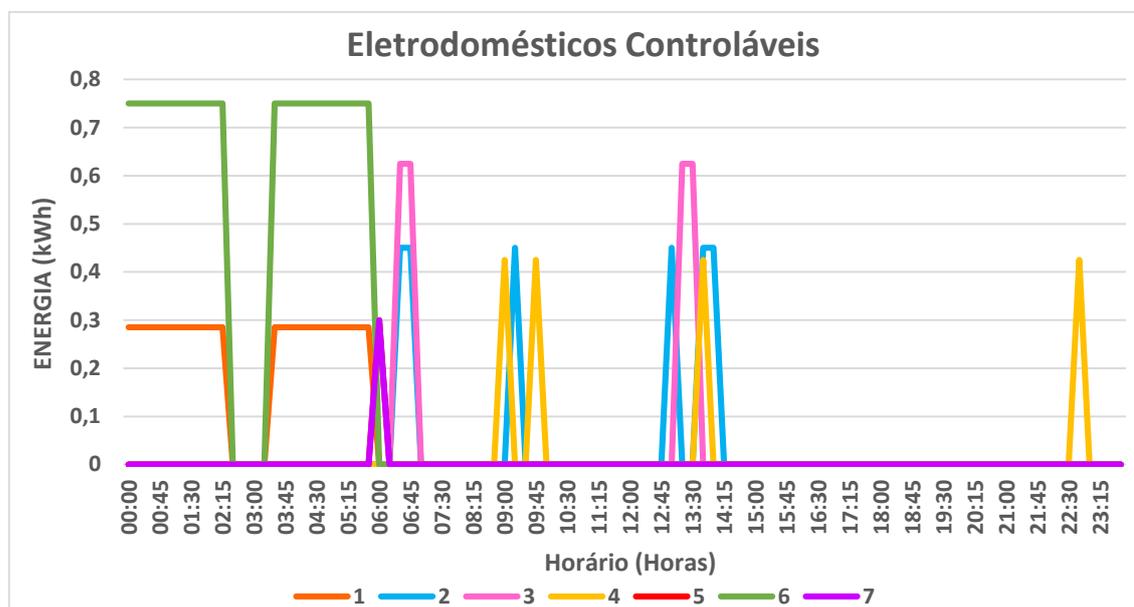


Fonte: Autora (2023).

De maneira semelhante ao que aconteceu com o BESS, o VE também teve um comportamento diferente se comparando com os casos apresentados anteriormente. Como neste somente os Casos 5 e 6 possuem o VE como uma carga residencial e como uma bateria, a análise comparativa de seu comportamento será feita somente entre esses dois casos. Quanto ao comportamento referente a e_{IVE_h} , se nota que ele foi carregado completamente durante a madrugada, como ocorreu no anterior, no entanto, o tempo de carregamento e a quantidade de energia que foi utilizada para carregar o VE neste caso foi maior do que a do anterior, isso também ocorre com a e_{VEI_h} , ao se comparar o descarregamento nos dois casos verifica-se que o tempo e a energia descarregada do VE foram em maior quantidade, o que pode ser explicado pelo fato de no Caso 6 se ter a possibilidade de exportar energia para rede, demandando assim, mais energia para a ser armazenada e para ser vendida, tanto para o VE quanto para o BESS. Quanto ao perfil da energia total das cargas, constata-se que ela teve o mesmo comportamento que foi apresentado anteriormente na Figura 40.

Na Figura 42 está exposto gráfico que contém cronograma de funcionamento dos aparelhos elétricos residenciais controláveis para o Caso 6.

Figura 42 – Gráfico do cronograma de funcionamento dos aparelhos elétricos não controláveis resultantes para o Caso 6.

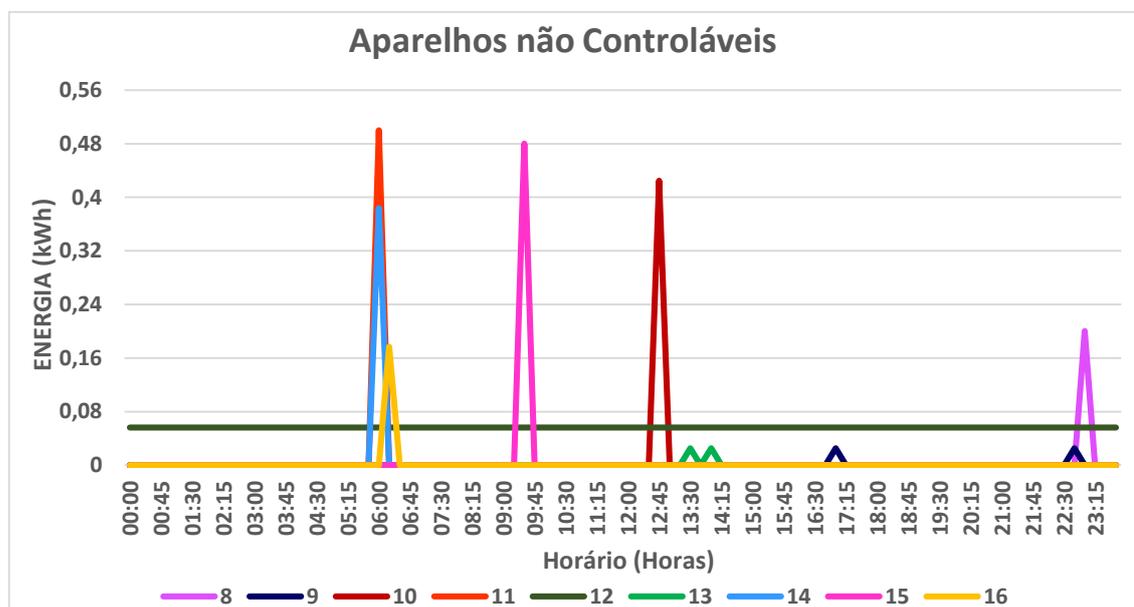


Fonte: Autora (2023).

A análise do comportamento dos aparelhos residenciais controláveis apresentados na Figura 23, denota que eles estão sendo atendidos de acordo com a sua respectiva janela de tempo da melhor forma possível, ou seja, nos momentos em que se tem os menores valores de tarifa de compra, quando se tem geração de energia FV e conseqüentemente está em conformidade com o descarregamento do BESS e VE. Observa-se que houveram alterações no comportamento das cargas controláveis ao se comparar com os Casos anteriores. Verificou-se que todos aparelhos tiveram sua operação temporal deslocada ou modificada em algum momento, como por exemplo os aparelhos 5 e 7 que tiveram seu atendimento dentro da faixa estabelecida pela janela de tempo, porém foram atendidos em um horário completamente diferente dos horários que as mesmas cargas foram atendidas nos casos anteriores.

O gráfico apresentado na Figura 43 contém as informações referentes ao cronograma de funcionamento dos aparelhos elétricos não controláveis resultantes para o Caso 6.

Figura 43 – Gráfico do cronograma de funcionamento dos aparelhos elétricos não controláveis resultantes para o Caso 6.



Fonte: Autora (2023).

Analisando os dados do gráfico dos aparelhos elétricos não controláveis é possível afirmar os ANCs também estão sendo atendidos nos períodos em que se tem os menores valores de tarifa de compra, quando se tem geração de energia FV e consequentemente está em conformidade com o descarregamento do BESS e VE. Com a visualização gráfica é possível verificar também que, com exceção do refrigerador (aparelho 12) deve estar ligado durante os 96 períodos, ao relacionar este caso com o Caso 1 todos os aparelhos tiveram sua operação temporal deslocada do período da madrugada para o período em que se começa a ter a geração de energia FV. Ao se comparar este caso com os casos 2, 3, 4 e 5, é possível observar que todos os aparelhos tiveram um comportamento diferentes neste caso, como por exemplo o Aparelho 15 que foi atendido no horário de 10h:45h nos Casos 2 e 3 e no horário de 10h:30h nos casos 4 e 5, já no Caso 6 esse horário foi ainda menor, às 09h:30h, esses deslocamentos nos horários de funcionamento dos aparelhos foram motivados pela possibilidade de exportar energia para a rede, o que não era possível nos casos anteriores.

Para se ter um comparativo mais adequado entre os custos obtidos nos 6 Casos, foi criada a Tabela 7 que apresenta o resultado otimizado do custo de compra de energia, custo de venda de energia, custo de não atendimento das cargas e o custo total (Z).

Tabela 7 – Resultados dos custos de compra e venda de energia, custo de não atendimento das cargas e custo total para os 6 Casos.

Custos (R\$)	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6
Custo de Compra de Energia	12,241501	5,233446	7,679538	6,188572	6,033768	12,09614
Custo de Venda de Energia	0	0	0	0	0	-17,94053
Custo de não Atendimento	0	0	0	0	0	0
Z	12,241501	5,233446	7,679538	6,188572	6,033768	-5,84439

Fonte: Autora (2023).

Ao analisar os custos é possível verificar que o Caso 6 foi o que obteve o menor custo dentre os todos com um valor de redução de custo de R\$ 5,84, isso se deve ao fato de que esse caso fez uso de todos os recursos energéticos distribuídos que se podia implantar nessa residência, além disso, nesse caso foi obedecida janela de tempo dos aparelhos, o que torna esse caso o escolhido como sendo o melhor, pois além da exigência de se ter o menor custo ele também obedeceu a janela de tempo que foi uma exigência para garantir o conforto do usuário residencial. O Caso 2 foi o segundo que teve o menor custo de eletricidade o que é explicado por não ter sido considerada a restrição de janela de tempo dos aparelhos, portanto tinha mais liberdade para atender aos aparelhos nos horários em que era mais barato, porém ele não seguiu as exigências do usuário logo, ele não pode ser considerado como o melhor.

Visando realizar um comparativo percentual entre os casos que tinha algum dos RED implantados na residência com o caso que não tinha nenhum, foi feita a Tabela 8, que apresenta uma comparação percentual entre os custos totais para 6 Casos.

Tabela 8 – Comparação percentual entre os custos totais para 6 Casos.

Casos	Custos
Caso 1	0%
Caso 2	-57,248%
Caso 3	-37,266%
Caso 4	-49,446%
Caso 5	-50,711%
Caso 6	-147,742%

Fonte: Autora (2023).

A partir da leitura dos resultados apresentado na Tabela 7 e juntamente com a comparação percentual apresentada na Tabela 8, se tem de maneira mais evidenciada que o Caso 6 foi o mais eficiente, pois foi o que retornou uma maior eficiência com o uso dos RED,

chegando a uma redução de 147,74% no custo total de eletricidade da residência ao se comparar com o caso que não utilizou os recursos e com os outros casos que utilizaram o(s) recursos.

Com os resultados apresentados neste capítulo é possível demonstrar a eficiência da metodologia proposta, pois ocorre a redução de 147,74% de custos de eletricidade, bem como a autonomia energética diante de eventual indisponibilidade do fornecimento de energia elétrica, parte da distribuidora.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta uma abordagem determinística baseada em programação linear inteira mista para definir um cronograma de consumo dos dispositivos de uma residência com vistas à operação econômica e contemplando aspectos relativos ao controle de demanda. Neste contexto, também foram considerados dispositivos de geração fotovoltaica e de armazenamento (BESS e VE) e com o uso desses dispositivos se tem a possibilidade de exportar energia para a rede.

A contribuição específica se encontra na Programação Linear Inteira Mista para o gerenciamento de uma residência. A solução encontrada possibilita o uso dos recursos energéticos residenciais ao menor custo. A resposta à demanda é alcançada por meio da programação do consumo dos dispositivos da residência, possibilitando explorar casos de contingência (impossibilidade de fornecimento da energia da rede) e otimização do custo da energia.

Aplicando um inversor híbrido integrado com geração FV, um sistema de armazenamento de energia (BESS) e um veículo elétrico V2G se obtém uma solução para o problema de gerenciamento viável, possibilitando o atendimento da carga da residência tanto pelo BESS quanto pelo veículo elétrico nos momentos em que a operação ilhada for necessária.

Os resultados evidenciam que o Caso 6 é o mais eficiente, pois contempla a relação de compromisso entre o custo e o conforto se refere de maneira otimizada, que resulta em uma redução no custo referentes as despesas com energia elétrica igual a R\$ 5,84, gerando assim uma redução de 147,74% no custo total de eletricidade da residência com o uso dos REDs ao se comparar com o caso em que esses recursos não foram utilizados. Nesse sentido, o método proposto mostrou-se adequado diante dos objetivos propostos neste estudo.

6.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para serem abordadas em trabalhos futuros tendo como base está dissertação tem-se:

1. Explorar um modelo HEMS que considere a reposta à demanda tanto do lado da concessionária quanto do lado do usuário;

2. Considerar um cenário em que a residência inteligente possa se encontrar em um estado totalmente ilhada, sem nenhum contato com a *grid*;
3. Considerar a estocasticidade do problema;
4. Explorar o HEMS sob a ótica das distribuidoras de energia elétrica, considerando suporte à operação e os serviços ancilares.

REFERÊNCIAS

- ABB. **Energy Management: Smart Home devices to increase your energy efficiency.** Disponível em: <https://new.abb.com/buildings/smarter-home/energy>. Acesso: 15 de nov. 2022.
- AALAMI, H.; YOUSEFI, G. R.; PARSA MOGHADAM, M. **Demand response model considering EDRP and TOU programs.** Transmission and Distribution Exposition Conference: 2008 IEEE PES Powering Toward the Future, PIMS 2008, 2008.
- ACKERMANN, T.; ANDERSSON, G.; SÖDER, L. **Distributed generation: a definition.** Electric Power Systems Research, v. 57, n. 3, p. 195–204, 20 abr. 2001.
- AKBARI-DIBAVAR, A. et al. **Smart home energy management using hybrid robust-stochastic optimization.** Computers and Industrial Engineering, v. 143, 2020.
- ALHELOU, H. H.; SIANO, P. **Special Issue on Advances and Technologies in High Voltage Power Systems Operation, Control, Protection, and Security.** Applied Sciences 2021, Vol. 11, Page 274, v. 11, n. 1, p. 274, 30 dez. 2020.
- ALILOU, M.; TOUSI, B.; SHAYEGHI, H. **Multi-objective energy management of smart homes considering uncertainty in wind power forecasting.** Electrical Engineering, v. 103, n. 3, p. 1367–1383, 1 jun. 2021.
- AMER, A. et al. **Home energy management system embedded with a multi-objective demand response optimization model to benefit customers and operators.** Energies, v. 14, n. 2, 2021.
- ARANDA, J. A. S. et al. **Collection and analysis of physiological data in smart environments: a systematic mapping.** Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, v. 11, n. 7, p. 2883–2897, 2020.
- ARENA. **Demand response.** Disponível em: <https://arena.gov.au/renewable-energy/demand-response/>. Acesso em: 19 jun. 2022.
- AZAMI, H.; ALIZADEH, B. A. M.; ABAPOUR, M. **Optimal Smart Home Scheduling with Considering Hybrid Resource Management.** 2021 11th Smart Grid Conference, SGC 2021. *Anais...IEEE*, 7 dez. 2021. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9664049/>. Acesso em: 8 mar. 2022
- AZEVEDO, R. M. et al. **Dynamic and proactive matheuristic for AC/DC hybrid smart home energy operation considering load, energy resources and price uncertainties.** International Journal of Electrical Power and Energy Systems, v. 137, n. July 2021, p. 107463, 2022.
- BERTOLDI, P.; ZANCANELLA, P.; BOZA-KISS, B. **Demand Response status in EU Member States.** Publications Office, p. 1–153, 2016.
- CELIK, B. et al. **Decentralized neighborhood energy management with coordinated**

smart home energy sharing. IEEE Transactions on Smart Grid, v. 9, n. 6, p. 6387–6397, 1 nov. 2018.

DAVIS, M. J. M.; HIRALAL, P. **Batteries as a Service: A New Look at Electricity Peak Demand Management for Houses in the UK**. Procedia Engineering, v. 145, p. 1448–1455, 1 jan. 2016.

EUROPEAN COMMISSION, Joint Research Centre, Bertoldi P. **Proceedings of the 9th international conference on energy efficiency in domestic appliances and lighting (EEDAL '17). Part I**. Publications Office of the European Union; 2018.

EPE. **NOTA TÉCNICA DEA 001/17 Projeção da demanda de energia elétrica**. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro: 2017. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-245/topico-261/DEA_001_2017 - Projeções da Demanda de Energia Elétrica 2017-2026_VF%5B1%5D.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-245/topico-261/DEA_001_2017_-_Projeções_da_Demanda_de_Energia_Elétrica_2017-2026_VF%5B1%5D.pdf)>.

EPE. **Recursos Energéticos Distribuídos 2050**. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro: 2018. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br>>.

EPE. **Recursos Energéticos Distribuídos: Documento de apoio ao PNE 2050**. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro: 2019. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br>>.

EPE. **Nota Técnica - Resposta da Demanda: Conceitos, aspectos regulatórios e planejamento energético**. Rio de Janeiro: 2019. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-389/NT_EPE_DEE-NT-022_2019-r0.pdf>.

EPE. **Plano Nacional de Energia - 2050**. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro: 2020. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br>>. Acesso em: 22 jun. 2022.

EPE. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2022: Ano base 2021**. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro: 2022. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br>>.

ERDINC, O. et al. **A new perspective for sizing of distributed generation and energy storage for smart households under demand response**. Applied Energy, v. 143, p. 26–37, 2015a.

ERDINC, O. et al. **Smart Household Operation Considering Bi-Directional EV and ESS Utilization by Real-Time Pricing-Based DR**. IEEE Transactions on Smart Grid, v. 6, n. 3, p. 1281–1291, 1 maio 2015b.

FGV ENERGIA. **Recursos Energéticos Distribuídos** Cadernos FGV ENERGIA. Rio de Janeiro: 2016.

GHRITLAHRE, H. K. et al. **A detailed review of various types of solar air heaters performance**. Solar Energy, v. 237, p. 173–195, 1 maio 2022.

HAES ALHELOU, H.; GOLSHAN, M. E. H.; SIANO, P. **Frequency response models and**

control in smart power systems with high penetration of renewable energy sources. Computers & Electrical Engineering, v. 96, p. 107477, 1 dez. 2021.

HOU, X. et al. **Smart Home Energy Management Optimization Method Considering Energy Storage and Electric Vehicle.** IEEE Access, v. 7, p. 144010–144020, 2019a.

HOU, X. et al. **Smart Home Energy Management Optimization Method Considering Energy Storage and Electric Vehicle.** IEEE Access, v. 7, p. 144010–144020, 2019b.

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, 1 jan. 2018.

HUANG, Y.; TIAN, H.; WANG, L. **Demand response for home energy management system.** International Journal of Electrical Power and Energy Systems, v. 73, p. 448–455, 30 maio 2015.

IMRAN, A. et al. **Heuristic-Based Programable Controller for Efficient Energy Management under Renewable Energy Sources and Energy Storage System in Smart Grid.** IEEE Access, v. 8, p. 139587–139608, 2020.

IRENA. **Electricity Storage.** International Renewable Energy Agency. [s.l.:s.n.]. Disponível em: <<https://www.irena.org/costs/Electricity-Storage>>. Acesso em: 4 jul. 2022.

IRENA. **Innovation landscape for a renewable-powered future: Solutions to integrate variable renewables.** International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi: 2019.

IRENA. **Grid codes for renewable powered systems.** International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi.: 2022. Disponível em: <www.irena.org/publications>.

JAVADI, M. S. et al. **Optimal self-scheduling of home energy management system in the presence of photovoltaic power generation and batteries.** Energy, v. 210, 2020.

JINDAL, A.; SINGH, M.; KUMAR, N. **Consumption-aware data analytical demand response scheme for peak load reduction in smart grid.** IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 65, n. 11, p. 8993–9004, 2018.

CORBIN, J.; STRAUSS, A. **Basics of Qualitative Research: Techniques and Procedures.** Basic qualitative research, 1998.

KESHAV, S. **How to read a paper.** Computer Communication Review, jul. 2007. Disponível em: <https://www.mendeley.com/catalogue/8c5e378a-6b3f-3c9f-8d78-41cf6a229374/?utm_source=desktop&utm_medium=1.19.8&utm_campaign=open_catalog&userDocumentId=%7B2d44c761-c85e-32ea-bc19-9f5eacbc1164%7D>. Acesso em: 26 ago. 2022.

KIRSCHEN, D. S. **Demand-side view of electricity markets.** IEEE Transactions on Power Systems, v. 18, n. 2, p. 520–527, maio 2003.

KOLTSAKLIS, N. E. et al. **An MILP model for the optimal energy management of a smart household.** International Conference on the European Energy Market, EEM.

Anais...2019.

KWON, K.; LEE, S.; KIM, S. **AI-Based Home Energy Management System Considering Energy Efficiency and Resident Satisfaction**. IEEE Internet of Things Journal, v. 9, n. 2, 2022.

LI, X.; WANG, S. **Energy management and operational control methods for grid battery energy storage systems**. CSEE Journal of Power and Energy Systems, v. 7, n. 5, 2021.

LI, Z. et al. **Smart energy management model for households considering incentive-based demand response**. Proceedings - 2021 Power System and Green Energy Conference, PSGECC 2021. Anais...Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021.

LU, Q.; ZHANG, Z.; LÜ, S. **Home energy management in smart households: Optimal appliance scheduling model with photovoltaic energy storage system**. Energy Reports, v. 6, 2020.

LUO, F. et al. **Optimal home energy management system with demand charge tariff and appliance operational dependencies**. IEEE Transactions on Smart Grid, v. 11, n. 1, 2020.

MAK, D.; CHOI, D. H. **Optimization framework for coordinated operation of home energy management system and Volt-VAR optimization in unbalanced active distribution networks considering uncertainties**. Applied Energy, v. 276, 2020.

MARQUES, F. A. S. et al. **Impactos da expansão da geração distribuída nos sistemas de distribuição de energia elétrica**. Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação Universidade Estadual de Campinas. Anais...Campinas: 2004. Disponível em: <<http://www.proceedings.scielo.br/pdf/agrener/n5v2/068.pdf>>. Acesso em: 22 jun. 2022

MERDANOĞLU, H. et al. **Finding optimal schedules in a home energy management system**. Electric Power Systems Research, v. 182, 2020.

MHAISEN, N.; FETAIS, N.; MASSOUD, A. **Secure smart contract-enabled control of battery energy storage systems against cyber-attacks**. Alexandria Engineering Journal, v. 58, n. 4, 2019.

NAIR, N. K. C.; GARIMELLA, N. **Battery energy storage systems: Assessment for small-scale renewable energy integration**. Energy and Buildings, v. 42, n. 11, 2010.

OFFICE OF ELECTRICITY. **Demand Response**. Disponível em: <<https://www.energy.gov/oe/activities/technology-development/grid-modernization-and-smart-grid/demand-response>>. Acesso em: 19 jun. 2022.

PAL, S.; KUMAR, R. **Smart Household Energy Management by Employing EV and BESS as Enabling Technologies**. India International Conference on Power Electronics, IICPE. Anais...2018.

PALMETTO SOLAR. **Hybrid Inverter for Solar: Pros, Cons, and What To Know**. Disponível em: <<https://palmetto.com/learning-center/blog/hybrid-inverter-for-solar-guide-pros-cons>>. Acesso em: 29 out. 2022.

PATHAK, P. K.; GUPTA, A. R. **Battery Energy Storage System; Battery Energy Storage System**. Computational Intelligence and Communication Technology, 2018.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. DE. **Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

RADU, H.; MUNTEANU, A.; AGAVANAKIS, K. **An Appliance Scheduling System for Residential Energy Management**. Sensors 2021, v. 21, n. 9, 2021.

REN21- RENEWABLES NOW. **Renewables 2020 Global Status Report**. Paris: [s.n.]. Disponível em: <https://www.ren21.net/gsr-2020/chapters/chapter_01/chapter_01/#target_2>. Acesso em: 23 jun. 2022.

ROSSI, B.; CHREN, S. **Smart Grids Data Analysis: A Systematic Mapping Study**. IEEE Transactions on Industrial Informatics, v. 16, n. 6, 2020.

SANGSWANG, A.; KONGHIRUN, M. **Optimal Strategies in Home Energy Management System Integrating Solar Power, Energy Storage, and Vehicle-to-Grid for Grid Support and Energy Efficiency**. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 56, n. 5, 2020.

SCHNEIDER ELECTRIC. **Wiser Energy system from Schneider Electric: energy management**. Disponível em: <https://www.se.com/ww/en/product-range/62107-wiser-energy/#overview>. Acesso: 15 de nov. 2022.

SHAHSAVARI, A.; AKBARI, M. **Potential of solar energy in developing countries for reducing energy-related emissions**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 90, 2018.

SHAKERI, M. et al. **An intelligent system architecture in home energy management systems (HEMS) for efficient demand response in smart grid**. Energy and Buildings, v. 138, 2017.

SHAREEF, H. et al. **Review on Home Energy Management System Considering Demand Responses, Smart Technologies, and Intelligent Controllers**. IEEE Access, v. 6, 2018.

SHAYANI, R. A. **Medição do rendimento global de um sistema Fotovoltaico isolado utilizando módulos de 32 células**. 2006. 225 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)-Universidade de Brasília, Brasília, 2006..

SINGH, G. K. **Solar power generation by PV (photovoltaic) technology: A review**. Energy, v. 53, 2013.

TANTAWY, E. S. F.; AMER, G. M.; FAYEZ, H. M. **Scheduling Home Appliances with Integration of Hybrid Energy Sources using Intelligent Algorithms**. Ain Shams Engineering Journal, v. 13, n. 4, 2022.

TASCIKARAOGLU, A.; BOYNUEGRI, A. R.; UZUNOGLU, M. **A demand side management strategy based on forecasting of residential renewable sources: A smart home system in Turkey**. Energy and Buildings, v. 80, 2014.

- TUSHAR, M. H. K.; ZEINEDDINE, A. W.; ASSI, C. **Demand-Side Management by Regulating Charging and Discharging of the EV, ESS, and Utilizing Renewable Energy.** IEEE Transactions on Industrial Informatics, v. 14, n. 1, 2018.
- TUTKUN, N. et al. **Intelligent scheduling of smart home appliances based on demand response considering the cost and peak-to-average ratio in residential homes.** Energies, v. 14, n. 24, 2021.
- UN-NOOR, F. et al. **A Comprehensive Study of Key Electric Vehicle (EV) Components, Technologies, Challenges, Impacts, and Future Direction of Development.** Energies, v. 10, n. 8, 2017.
- UR REHMAN, U.; YAQOOB, K.; ADIL KHAN, M. **Optimal power management framework for smart homes using electric vehicles and energy storage.** International Journal of Electrical Power and Energy Systems, v. 134, 2022.
- 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 and Tutorials, v. 17, n. 1, 2015.
- WU, X. et al. **Stochastic Optimal Energy Management of Smart Home With PEV Energy Storage.** IEEE Transactions on Smart Grid, v. 9, n. 3, 2018.
- XIANG, X.; CAO, J. **An efficient authenticated key agreement scheme supporting privacy-preservation for smart grid communication.** Electric Power Systems Research, v. 203, 2022.
- YANG, Q.; WANG, H. **Distributed energy trading management for renewable prosumers with HVAC and energy storage.** Energy Reports, v. 7, 2021.
- YANG, Y. et al. **Battery energy storage system size determination in renewable energy systems: A review.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 91, 2018.
- YU, N.; YU, J. L. **Optimal TOU decision considering demand response model.** 2006 International Conference on Power System Technology, POWERCON2006, 2006.
- ZAFAR, U.; BAYHAN, S.; SANFILIPPO, A. **Home Energy Management System Concepts, Configurations, and Technologies for the Smart Grid.** IEEE Access, v. 8, 2020.
- ZAMANLOO, S. et al. **Optimal two-level active and reactive energy management of residential appliances in smart homes.** Sustainable Cities and Society, v. 71, 2021.
- ZEYNALI, S. et al. **Two-stage stochastic home energy management strategy considering electric vehicle and battery energy storage system: An ANN-based scenario generation methodology.** Sustainable Energy Technologies and Assessments, v. 39, 2020.
- ZHANG, Y. et al. **A novel multiobjective optimization algorithm for home energy management system in smart grid.** Mathematical Problems in Engineering, v. 2015, 2015.

ZHAO, X. et al. **Aggregated operation of heterogeneous small-capacity distributed energy resources in peer-to-peer energy trading.** International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 141, 2022.

ZHENG, Y. et al. **Optimal Operation of Battery Energy Storage System Considering Distribution System Uncertainty.** IEEE Transactions on Sustainable Energy, v. 9, n. 3, 2018.

APÊNDICE A – TABELA COM OS RESULTADOS PARA O CASO 1.

H	E_FV	T_buy	T_sell	e_GI_h	e_IG_h	e_BI_h	e_IB_h	e_VEI_h	e_IVE_h	e_L_h
00:00	0	0,28	0,15	1,30178	0	0	0	0	0,21053	1,09125
00:15	0	0,28	0,15	1,09125	0	0	0	0	0	1,09125
00:30	0	0,28	0,15	1,54125	0	0	0	0	0	1,54125
00:45	0	0,29	0,16	1,09125	0	0	0	0	0	1,09125
01:00	0	0,29	0,16	1,09125	0	0	0	0	0	1,09125
01:15	0	0,29	0,16	1,09125	0	0	0	0	0	1,09125
01:30	0	0,28	0,15	1,09125	0	0	0	0	0	1,09125
01:45	0	0,28	0,15	1,09125	0	0	0	0	0	1,09125
02:00	0	0,29	0,16	1,09125	0	0	0	0	0	1,09125
02:15	0	0,29	0,16	1,09125	0	0	0	0	0	1,09125
02:30	0	0,295	0,17	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
02:45	0	0,295	0,17	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
03:00	0	0,295	0,17	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
03:15	0	0,295	0,17	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
03:30	0	0,275	0,145	4,8825	0	0	0	0	0	4,8825
03:45	0	0,275	0,145	3,14125	0	0	0	0	0	3,14125
04:00	0	0,275	0,145	1,56625	0	0	0	0	0	1,56625
04:15	0	0,275	0,145	2,59125	0	0	0	0	0	2,59125
04:30	0	0,275	0,145	2,59125	0	0	0	0	0	2,59125
04:45	0	0,29	0,16	1,09125	0	0	0	0	0	1,09125
05:00	0	0,29	0,16	1,09125	0	0	0	0	0	1,09125
05:15	0	0,29	0,16	1,09125	0	0	0	0	0	1,09125
05:30	0	0,29	0,16	1,09125	0	0	0	0	0	1,09125
05:45	0	0,29	0,16	1,09125	0	0	0	0	0	1,09125
08:30	0	0,575	0,41	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
06:15	0	0,58	0,45	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
06:30	0	0,58	0,45	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
06:45	0	0,58	0,43	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
07:00	0	0,68	0,61	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
07:15	0	0,67976	0,611782	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
07:30	0	0,85	0,765	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
07:45	0	0,85	0,765	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
08:00	0	0,79	0,711	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
08:15	0	0,67976	0,611782	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
08:30	0	0,67976	0,611782	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
08:45	0	0,67976	0,611782	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
09:00	0	0,66	0,594	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
09:15	0	0,65	0,585	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
09:30	0	0,65	0,585	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
09:45	0	0,66	0,594	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
10:00	0	0,69	0,621	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
10:15	0	0,69	0,621	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
10:30	0	0,69	0,621	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625

10:45	0	0,71	0,639	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
11:00	0	0,715	0,6435	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
11:15	0	0,745	0,6705	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
11:30	0	0,75	0,675	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
11:45	0	0,725	0,6525	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
12:00	0	0,77	0,693	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
12:15	0	0,734	0,6606	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
12:30	0	0,74	0,666	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
12:45	0	0,67976	0,61178	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
13:00	0	0,65	0,585	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
13:15	0	0,65	0,585	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
13:30	0	0,64	0,576	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
13:45	0	0,64	0,576	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
14:00	0	0,645	0,5805	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
14:15	0	0,74	0,666	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
14:30	0	0,89	0,801	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
14:45	0	0,91	0,819	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
15:00	0	0,67976	0,61178	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
15:15	0	0,67976	0,61178	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
15:30	0	0,67976	0,61178	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
15:45	0	0,72	0,648	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
16:00	0	0,75	0,675	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
16:15	0	0,67976	0,61178	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
16:30	0	0,67976	0,61178	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
16:45	0	0,67976	0,61178	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
17:00	0	0,67976	0,61178	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
17:15	0	0,84	0,756	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
17:30	0	0,89	0,801	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
17:45	0	0,79	0,711	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
18:00	0	1,057	0,9513	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
18:15	0	1,057	0,9513	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
18:30	0	1,057	0,9513	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
18:45	0	1,057	0,9513	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
19:00	0	1,24	1,116	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
19:15	0	1,25	1,125	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
19:30	0	1,245	1,1205	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
19:45	0	1,45	1,305	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
20:00	0	1,234	1,1106	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
20:15	0	1,245	1,1205	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
20:30	0	1,15	1,035	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
20:45	0	1,145	1,0305	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
21:00	0	1,18	1,062	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
21:15	0	1,134	1,0206	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
21:30	0	1,07	0,963	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
21:45	0	0,789	0,7101	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
22:00	0	0,788	0,7092	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
22:15	0	0,745	0,6705	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625

22:30	0	0,698	0,6282	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
22:45	0	0,68	0,612	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
23:00	0	0,67976	0,61178	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
23:15	0	0,67976	0,61178	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
23:30	0	0,456	0,4104	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
23:45	0	0,455	0,4095	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625

10:45	0,58929	0,71	0,639	0	0	0	0	0	0	0,5365
11:00	0,70714	0,715	0,6435	0	0	0	0	0	0	0,6813
11:15	0,70714	0,745	0,6705	0	0	0	0	0	0	0,7063
11:30	0,70714	0,75	0,675	0	0	0	0	0	0	0,7063
11:45	0,70714	0,725	0,6525	0	0	0	0	0	0	0,6813
12:00	0,825	0,77	0,693	0	0	0	0	0	0	0,8063
12:15	0,825	0,734	0,6606	0	0	0	0	0	0	0,8063
12:30	0,825	0,74	0,666	0	0	0	0	0	0	0,8063
12:45	0,825	0,68	0,6118	0	0	0	0	0	0	0,8063
13:00	0,70714	0,65	0,585	0,09911	0	0	0	0	0	0,8063
13:15	0,70714	0,65	0,585	0,09911	0	0	0	0	0	0,8063
13:30	0,70714	0,64	0,576	0,09911	0	0	0	0	0	0,8063
13:45	0,70714	0,64	0,576	0,09911	0	0	0	0	0	0,8063
14:00	0,58929	0,645	0,5805	0,05196	0	0	0	0	0	0,6413
14:15	0,58929	0,74	0,666	0	0	0	0	0	0	0,5063
14:30	0,58929	0,89	0,801	0	0	0	0	0	0	0,5563
14:45	0,58929	0,91	0,819	0	0	0	0	0	0	0,5063
15:00	0,47143	0,68	0,6118	0,00982	0	0	0	0	0	0,4813
15:15	0,47143	0,68	0,6118	0,00982	0	0	0	0	0	0,4813
15:30	0,47143	0,68	0,6118	0,00982	0	0	0	0	0	0,4813
15:45	0,47143	0,72	0,648	0	0	0	0	0	0	0,4403
16:00	0,35357	0,75	0,675	0	0	0	0	0	0	0,3413
16:15	0,35357	0,68	0,6118	0	0	0	0	0	0	0,3413
16:30	0,35357	0,68	0,6118	0	0	0	0	0	0	0,3413
16:45	0,35357	0,68	0,6118	0	0	0	0	0	0	0,3413
17:00	0,23571	0,68	0,6118	0,10554	0	0	0	0	0	0,3413
17:15	0,23571	0,84	0,756	0	0	0	0	0	0	0,2333
17:30	0,23571	0,89	0,801	0	0	0	0	0	0	0,2333
17:45	0,23571	0,79	0,711	0,02054	0	0	0	0	0	0,2563
18:00	0,11786	1,057	0,9513	0	0	0	0	0	0	0,0563
18:15	0,11786	1,057	0,9513	0	0	0	0	0	0	0,0813
18:30	0,11786	1,057	0,9513	0	0	0	0	0	0	0,0563
18:45	0,11786	1,057	0,9513	0	0	0	0	0	0	0,0563
19:00	0	1,24	1,116	0,05625	0	0	0	0	0	0,0563
19:15	0	1,25	1,125	0,05625	0	0	0	0	0	0,0563
19:30	0	1,245	1,1205	0,05625	0	0	0	0	0	0,0563
19:45	0	1,45	1,305	0,05625	0	0	0	0	0	0,0563
20:00	0	1,234	1,1106	0,05625	0	0	0	0	0	0,0563
20:15	0	1,245	1,1205	0,05625	0	0	0	0	0	0,0563
20:30	0	1,15	1,035	0,05625	0	0	0	0	0	0,0563
20:45	0	1,145	1,0305	0,05625	0	0	0	0	0	0,0563
21:00	0	1,18	1,062	0,05625	0	0	0	0	0	0,0563
21:15	0	1,134	1,0206	0,05625	0	0	0	0	0	0,0563
21:30	0	1,07	0,963	0,05625	0	0	0	0	0	0,0563
21:45	0	0,789	0,7101	0,05625	0	0	0	0	0	0,0563
22:00	0	0,788	0,7092	0,05625	0	0	0	0	0	0,0563
22:15	0	0,745	0,6705	0,05625	0	0	0	0	0	0,0563

22:30	0	0,698	0,6282	0,05625	0	0	0	0	0	0,0563
22:45	0	0,68	0,612	0,05625	0	0	0	0	0	0,0563
23:00	0	0,68	0,6118	0,05625	0	0	0	0	0	0,0563
23:15	0	0,68	0,6118	0,05625	0	0	0	0	0	0,0563
23:30	0	0,456	0,4104	0,05625	0	0	0	0	0	0,0563
23:45	0	0,455	0,4095	0,05625	0	0	0	0	0	0,0563

10:00	0,58929	0,69	0,621	0	0	0	0	0	0	0,48125
10:15	0,58929	0,69	0,621	0	0	0	0	0	0	0,48125
10:30	0,58929	0,69	0,621	0	0	0	0	0	0	0,50625
10:45	0,58929	0,71	0,639	0	0	0	0	0	0	0,5365
11:00	0,70714	0,715	0,6435	0	0	0	0	0	0	0,50625
11:15	0,70714	0,745	0,6705	0	0	0	0	0	0	0,68125
11:30	0,70714	0,75	0,675	0	0	0	0	0	0	0,50625
11:45	0,70714	0,725	0,6525	0	0	0	0	0	0	0,68125
12:00	0,825	0,77	0,693	0	0	0	0	0	0	0,68125
12:15	0,825	0,734	0,6606	0	0	0	0	0	0	0,68125
12:30	0,825	0,74	0,666	0	0	0	0	0	0	0,05625
12:45	0,825	0,67976	0,61178	0	0	0	0	0	0	0,05625
13:00	0,70714	0,65	0,585	0	0	0	0	0	0	0,53125
13:15	0,70714	0,65	0,585	0	0	0	0	0	0	0,50625
13:30	0,70714	0,64	0,576	0	0	0	0	0	0	0,38125
13:45	0,70714	0,64	0,576	0	0	0	0	0	0	0,50625
14:00	0,58929	0,645	0,5805	0	0	0	0	0	0	0,50625
14:15	0,58929	0,74	0,666	0	0	0	0	0	0	0,58125
14:30	0,58929	0,89	0,801	0	0	0	0	0	0	0,50625
14:45	0,58929	0,91	0,819	0	0	0	0	0	0	0,50625
15:00	0,47143	0,67976	0,61178	0	0	0	0	0	0	0,05625
15:15	0,47143	0,67976	0,61178	0	0	0	0	0	0	0,08125
15:30	0,47143	0,67976	0,61178	0	0	0	0	0	0	0,05625
15:45	0,47143	0,72	0,648	0	0	0	0	0	0	0,05625
16:00	0,35357	0,75	0,675	0	0	0	0	0	0	0,08125
16:15	0,35357	0,67976	0,61178	0	0	0	0	0	0	0,05625
16:30	0,35357	0,67976	0,61178	0	0	0	0	0	0	0,05625
16:45	0,35357	0,67976	0,61178	0	0	0	0	0	0	0,05625
17:00	0,23571	0,67976	0,61178	0	0	0	0	0	0	0,08125
17:15	0,23571	0,84	0,756	0	0	0	0	0	0	0,08125
17:30	0,23571	0,89	0,801	0	0	0	0	0	0	0,05625
17:45	0,23571	0,79	0,711	0	0	0	0	0	0	0,08125
18:00	0,11786	1,057	0,9513	0	0	0	0	0	0	0,05625
18:15	0,11786	1,057	0,9513	0	0	0	0	0	0	0,05625
18:30	0,11786	1,057	0,9513	0	0	0	0	0	0	0,05625
18:45	0,11786	1,057	0,9513	0	0	0	0	0	0	0,05625
19:00	0	1,24	1,116	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
19:15	0	1,25	1,125	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
19:30	0	1,245	1,1205	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
19:45	0	1,45	1,305	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
20:00	0	1,234	1,1106	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
20:15	0	1,245	1,1205	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
20:30	0	1,15	1,035	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
20:45	0	1,145	1,0305	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625

21:00	0	1,18	1,062	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
21:15	0	1,134	1,0206	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
21:30	0	1,07	0,963	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
21:45	0	0,789	0,7101	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
22:00	0	0,788	0,7092	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
22:15	0	0,745	0,6705	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
22:30	0	0,698	0,6282	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
22:45	0	0,68	0,612	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
23:00	0	0,67976	0,61178	0,25625	0	0	0	0	0	0,25625
23:15	0	0,67976	0,61178	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
23:30	0	0,456	0,4104	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
23:45	0	0,455	0,4095	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625

APÊNDICE D – TABELA COM OS RESULTADOS PARA O CASO 4.

H	E_FV	T_buy	T_sell	e_GI_h	e_IG_h	e_BI_h	e_IB_h	e_VEI_h	e_IVE_h	e_L_h
00:00	0	0,28	0,15	1,53635	0	0	0,23457	0	0,21053	1,09125
00:15	0	0,28	0,15	1,09125	0	0	0	0	0	1,09125
00:30	0	0,28	0,15	1,09125	0	0	0	0	0	1,09125
00:45	0	0,29	0,16	1,09125	0	0	0	0	0	1,09125
01:00	0	0,29	0,16	1,09125	0	0	0	0	0	1,09125
01:15	0	0,29	0,16	0,34125	0	0	0	0	0	0,34125
01:30	0	0,28	0,15	1,09125	0	0	0	0	0	1,09125
01:45	0	0,28	0,15	1,09125	0	0	0	0	0	1,09125
02:00	0	0,29	0,16	1,09125	0	0	0	0	0	1,09125
02:15	0	0,29	0,16	0,34125	0	0	0	0	0	0,34125
02:30	0	0,295	0,17	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
02:45	0	0,295	0,17	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
03:00	0	0,295	0,17	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
03:15	0	0,295	0,17	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
03:30	0	0,275	0,145	1,09125	0	0	0	0	0	1,09125
03:45	0	0,275	0,145	1,09125	0	0	0	0	0	1,09125
04:00	0	0,275	0,145	1,09125	0	0	0	0	0	1,09125
04:15	0	0,275	0,145	1,09125	0	0	0	0	0	1,09125
04:30	0	0,275	0,145	1,09125	0	0	0	0	0	1,09125
04:45	0	0,29	0,16	0,34125	0	0	0	0	0	0,34125
05:00	0	0,29	0,16	0,34125	0	0	0	0	0	0,34125
05:15	0	0,29	0,16	1,09125	0	0	0	0	0	1,09125
05:30	0	0,29	0,16	0,34125	0	0	0	0	0	0,34125
05:45	0	0,29	0,16	1,09125	0	0	0	0	0	1,09125
06:00	0,118	0,575	0,41	0	0	0	0	0	0	0,05625
06:15	0,118	0,58	0,45	0	0	0	0	0	0	0,05625
06:30	0,118	0,58	0,45	0	0	0	0	0	0	0,05625
06:45	0,118	0,58	0,43	0	0	0	0	0	0	0,05625
07:00	0,236	0,68	0,61	0	0	0	0	0	0	0,05625
07:15	0,236	0,68	0,612	0	0	0	0	0	0	0,23325
07:30	0,236	0,85	0,765	0	0	0	0	0	0	0,05625
07:45	0,236	0,85	0,765	0	0	0	0	0	0	0,05625
08:00	0,354	0,79	0,711	0	0	0	0	0	0	0,05625
08:15	0,354	0,68	0,612	0,00268	0	0	0	0	0	0,35625
08:30	0,354	0,68	0,612	0	0	0	0	0	0	0,08125
08:45	0,354	0,68	0,612	0	0	0	0	0	0	0,08125
09:00	0,471	0,66	0,594	0	0	0	0	0	0	0,35625
09:15	0,471	0,65	0,585	0,00982	0	0	0	0	0	0,48125
09:30	0,471	0,65	0,585	0,00982	0	0	0	0	0	0,48125
09:45	0,471	0,66	0,594	0,00982	0	0	0	0	0	0,48125

10:00	0,589	0,69	0,621	0	0	0	0	0	0	0,50625
10:15	0,589	0,69	0,621	0	0	0	0	0	0	0,50625
10:30	0,589	0,69	0,621	0	0	0	0	0	0	0,5365
10:45	0,589	0,71	0,639	0	0	0	0	0	0	0,50625
11:00	0,707	0,715	0,644	0	0	0	0,65089	0	0	0,05625
11:15	0,707	0,745	0,671	0	0	0	0,65089	0	0	0,05625
11:30	0,707	0,75	0,675	0	0	0	0	0	0	0,68125
11:45	0,707	0,725	0,653	0	0	0	0	0	0	0,68125
12:00	0,825	0,77	0,693	0	0	0	0,75	0	0	0,05625
12:15	0,825	0,734	0,661	0	0	0	0,75	0	0	0,05625
12:30	0,825	0,74	0,666	0	0	0	0,75	0	0	0,05625
12:45	0,825	0,68	0,612	0	0	0	0,75	0	0	0,05625
13:00	0,707	0,65	0,585	0	0	0	0	0	0	0,48125
13:15	0,707	0,65	0,585	0	0	0	0,65089	0	0	0,05625
13:30	0,707	0,64	0,576	0	0	0	0	0	0	0,68125
13:45	0,707	0,64	0,576	0	0	0	0	0	0	0,68125
14:00	0,589	0,645	0,581	0	0	0	0	0	0	0,50625
14:15	0,589	0,74	0,666	0	0	0	0	0	0	0,50625
14:30	0,589	0,89	0,801	0	0	0	0	0	0	0,50625
14:45	0,589	0,91	0,819	0	0	0	0	0	0	0,55625
15:00	0,471	0,68	0,612	0	0	0	0	0	0	0,05625
15:15	0,471	0,68	0,612	0	0	0	0	0	0	0,05625
15:30	0,471	0,68	0,612	0,00982	0	0	0	0	0	0,48125
15:45	0,471	0,72	0,648	0	0	0	0	0	0	0,05625
16:00	0,354	0,75	0,675	0	0	0	0	0	0	0,05625
16:15	0,354	0,68	0,612	0	0	0	0	0	0	0,05625
16:30	0,354	0,68	0,612	0	0	0	0	0	0	0,05625
16:45	0,354	0,68	0,612	0	0	0	0	0	0	0,05625
17:00	0,236	0,68	0,612	0	0	0	0	0	0	0,05625
17:15	0,236	0,84	0,756	0	0	0	0	0	0	0,05625
17:30	0,236	0,89	0,801	0	0	0	0	0	0	0,08125
17:45	0,236	0,79	0,711	0	0	0	0	0	0	0,08125
18:00	0,118	1,057	0,951	0	0	0	0	0	0	0,08125
18:15	0,118	1,057	0,951	0	0	0	0	0	0	0,08125
18:30	0,118	1,057	0,951	0	0	0	0	0	0	0,08125
18:45	0,118	1,057	0,951	0	0	0	0	0	0	0,08125
19:00	0	1,24	1,116	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
19:15	0	1,25	1,125	0	0	0,2563	0	0	0	0,25625
19:30	0	1,245	1,121	0	0	0,0563	0	0	0	0,05625
19:45	0	1,45	1,305	0	0	0,4403	0	0	0	0,44025
20:00	0	1,234	1,111	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
20:15	0	1,245	1,121	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
20:30	0	1,15	1,035	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
20:45	0	1,145	1,031	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625

21:00	0	1,18	1,062	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
21:15	0	1,134	1,021	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
21:30	0	1,07	0,963	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
21:45	0	0,789	0,71	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
22:00	0	0,788	0,709	0,05625	0	0,75	0	0	0	0,80625
22:15	0	0,745	0,671	0,05625	0	0,75	0	0	0	0,80625
22:30	0	0,698	0,628	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
22:45	0	0,68	0,612	0,05625	0	0,75	0	0	0	0,80625
23:00	0	0,68	0,612	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
23:15	0	0,68	0,612	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
23:30	0	0,456	0,41	0,05625	0	0,75	0	0	0	0,80625
23:45	0	0,455	0,41	0,05625	0	0,75	0	0	0	0,80625

APÊNDICE E – TABELA COM OS RESULTADOS PARA O CASO 5.

H	E_FV	T_buy	T_sell	e_GI_h	e_IG_h	e_BI_h	e_IB_h	e_VEI_h	e_IVE_h	e_L_h
00:00	0	0,28	0,15	1,5123	0	0	0,21053	0	0,21053	1,09125
00:15	0	0,28	0,15	1,09125	0	0	0	0	0	1,09125
00:30	0	0,28	0,15	1,09125	0	0	0	0	0	1,09125
00:45	0	0,29	0,16	0,34125	0	0	0	0	0	0,34125
01:00	0	0,29	0,16	0,34125	0	0	0	0	0	0,34125
01:15	0	0,29	0,16	1,09125	0	0	0	0	0	1,09125
01:30	0	0,28	0,15	1,09125	0	0	0	0	0	1,09125
01:45	0	0,28	0,15	1,09125	0	0	0	0	0	1,09125
02:00	0	0,29	0,16	0,34125	0	0	0	0	0	0,34125
02:15	0	0,29	0,16	0,34125	0	0	0	0	0	0,34125
02:30	0	0,295	0,17	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
02:45	0	0,295	0,17	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
03:00	0	0,295	0,17	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
03:15	0	0,295	0,17	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
03:30	0	0,275	0,145	1,61266	0	0	0	0	0,52141	1,09125
03:45	0	0,275	0,145	1,09125	0	0	0	0	0	1,09125
04:00	0	0,275	0,145	1,09125	0	0	0	0	0	1,09125
04:15	0	0,275	0,145	1,09125	0	0	0	0	0	1,09125
04:30	0	0,275	0,145	1,09125	0	0	0	0	0	1,09125
04:45	0	0,29	0,16	1,09125	0	0	0	0	0	1,09125
05:00	0	0,29	0,16	1,09125	0	0	0	0	0	1,09125
05:15	0	0,29	0,16	0,34125	0	0	0	0	0	0,34125
05:30	0	0,29	0,16	1,09125	0	0	0	0	0	1,09125
05:45	0	0,29	0,16	1,09125	0	0	0	0	0	1,09125
08:30	0,12	0,575	0,41	0	0	0	0	0	0	0,05625
06:15	0,12	0,58	0,45	0	0	0	0	0	0	0,05625
06:30	0,12	0,58	0,45	0	0	0	0	0	0	0,05625
06:45	0,12	0,58	0,43	0	0	0	0	0	0	0,05625
07:00	0,24	0,68	0,61	0	0	0	0	0	0	0,05625
07:15	0,24	0,68	0,61178	0	0	0	0	0	0	0,05625
07:30	0,24	0,85	0,765	0	0	0	0	0	0	0,05625
07:45	0,24	0,85	0,765	0	0	0	0	0	0	0,23325
08:00	0,35	0,79	0,711	0	0	0	0	0	0	0,23325
08:15	0,35	0,68	0,61178	0	0	0	0	0	0	0,23325
08:30	0,35	0,68	0,61178	0,00268	0	0	0	0	0	0,35625
08:45	0,35	0,68	0,61178	0	0	0	0	0	0	0,05625
09:00	0,47	0,66	0,594	0	0	0	0	0	0	0,35625
09:15	0,47	0,65	0,585	0,00982	0	0	0	0	0	0,48125
09:30	0,47	0,65	0,585	0,00982	0	0	0	0	0	0,48125
09:45	0,47	0,66	0,594	0,00982	0	0	0	0	0	0,48125

10:00	0,59	0,69	0,621	0	0	0	0	0	0	0,50625
10:15	0,59	0,69	0,621	0	0	0	0	0	0	0,50625
10:30	0,59	0,69	0,621	0	0	0	0	0	0	0,5365
10:45	0,59	0,71	0,639	0	0	0	0	0	0	0,50625
11:00	0,71	0,715	0,6435	0	0	0	0	0	0	0,68125
11:15	0,71	0,745	0,6705	0	0	0	0	0	0	0,68125
11:30	0,71	0,75	0,675	0	0	0	0	0	0	0,68125
11:45	0,71	0,725	0,6525	0	0	0	0,65089	0	0	0,05625
12:00	0,83	0,77	0,693	0	0	0	0,75	0	0	0,05625
12:15	0,83	0,734	0,6606	0	0	0	0,75	0	0	0,05625
12:30	0,83	0,74	0,666	0	0	0	0,75	0	0	0,05625
12:45	0,83	0,68	0,61178	0	0	0	0,75	0	0	0,05625
13:00	0,71	0,65	0,585	0	0	0	0,65089	0	0	0,05625
13:15	0,71	0,65	0,585	0	0	0	0	0	0	0,50625
13:30	0,71	0,64	0,576	0	0	0	0,65089	0	0	0,05625
13:45	0,71	0,64	0,576	0	0	0	0	0	0	0,68125
14:00	0,59	0,645	0,5805	0	0	0	0	0	0	0,50625
14:15	0,59	0,74	0,666	0	0	0	0	0	0	0,50625
14:30	0,59	0,89	0,801	0	0	0	0	0	0	0,50625
14:45	0,59	0,91	0,819	0	0	0	0	0	0	0,55625
15:00	0,47	0,68	0,61178	0	0	0	0	0	0	0,05625
15:15	0,47	0,68	0,61178	0	0	0	0	0	0	0,05625
15:30	0,47	0,68	0,61178	0,00982	0	0	0	0	0	0,48125
15:45	0,47	0,72	0,648	0	0	0	0	0	0	0,05625
16:00	0,35	0,75	0,675	0	0	0	0	0	0	0,05625
16:15	0,35	0,68	0,61178	0	0	0	0	0	0	0,05625
16:30	0,35	0,68	0,61178	0	0	0	0	0	0	0,05625
16:45	0,35	0,68	0,61178	0	0	0	0	0	0	0,05625
17:00	0,24	0,68	0,61178	0	0	0	0	0	0	0,05625
17:15	0,24	0,84	0,756	0	0	0	0	0	0	0,08125
17:30	0,24	0,89	0,801	0	0	0	0	0	0	0,08125
17:45	0,24	0,79	0,711	0	0	0	0	0	0	0,05625
18:00	0,12	1,057	0,9513	0	0	0	0	0	0	0,05625
18:15	0,12	1,057	0,9513	0	0	0	0	0	0	0,08125
18:30	0,12	1,057	0,9513	0	0	0	0	0	0	0,08125
18:45	0,12	1,057	0,9513	0	0	0	0	0	0	0,05625
19:00	0	1,24	1,116	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
19:15	0	1,25	1,125	0	0	0,05625	0	0	0	0,05625
19:30	0	1,245	1,1205	0	0	0,05625	0	0	0	0,05625
19:45	0	1,45	1,305	0	0	0,64025	0	0	0	0,64025
20:00	0	1,234	1,1106	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
20:15	0	1,245	1,1205	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
20:30	0	1,15	1,035	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
20:45	0	1,145	1,0305	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625

21:00	0	1,18	1,062	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
21:15	0	1,134	1,0206	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
21:30	0	1,07	0,963	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
21:45	0	0,789	0,7101	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
22:00	0	0,788	0,7092	0	0	0,72824	0	0,07801	0	0,80625
22:15	0	0,745	0,6705	0	0	0	0	0,05625	0	0,05625
22:30	0	0,698	0,6282	0	0	0,75	0	0,05625	0	0,80625
22:45	0	0,68	0,612	0	0	0,75	0	0,05625	0	0,80625
23:00	0	0,68	0,61178	0	0	0,75	0	0,05625	0	0,80625
23:15	0	0,68	0,61178	0	0	0	0	0,05625	0	0,05625
23:30	0	0,456	0,4104	0	0	0	0	0,05625	0	0,05625
23:45	0	0,455	0,4095	0	0	0,75	0	0,05625	0	0,80625

APÊNDICE F – TABELA COM OS RESULTADOS PARA O CASO 6.

H	E_FV	T_buy	T_sell	e_GI_h	e_IG_h	e_BI_h	e_IB_h	e_VEI_h	e_IVE_h	e_L_h
00:00	0	0,28	0,15	2,59125	0	0	0,75	0	0,75	1,09125
00:15	0	0,28	0,15	2,59125	0	0	0,75	0	0,75	1,09125
00:30	0	0,28	0,15	1,84125	0	0	0	0	0,75	1,09125
00:45	0	0,29	0,16	1,09125	0	0	0	0	0	1,09125
01:00	0	0,29	0,16	1,09125	0	0	0	0	0	1,09125
01:15	0	0,29	0,16	1,09125	0	0	0	0	0	1,09125
01:30	0	0,28	0,15	1,84125	0	0	0,75	0	0	1,09125
01:45	0	0,28	0,15	1,09125	0	0	0	0	0	1,09125
02:00	0	0,29	0,16	1,09125	0	0	0	0	0	1,09125
02:15	0	0,29	0,16	1,09125	0	0	0	0	0	1,09125
02:30	0	0,295	0,17	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
02:45	0	0,295	0,17	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
03:00	0	0,295	0,17	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
03:15	0	0,295	0,17	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
03:30	0	0,275	0,145	2,59125	0	0	0,75	0	0,75	1,09125
03:45	0	0,275	0,145	2,59125	0	0	0,75	0	0,75	1,09125
04:00	0	0,275	0,145	2,59125	0	0	0,75	0	0,75	1,09125
04:15	0	0,275	0,145	2,59125	0	0	0,75	0	0,75	1,09125
04:30	0	0,275	0,145	2,59125	0	0	0,75	0	0,75	1,09125
04:45	0	0,29	0,16	1,09125	0	0	0	0	0	1,09125
05:00	0	0,29	0,16	1,09125	0	0	0	0	0	1,09125
05:15	0	0,29	0,16	1,09125	0	0	0	0	0	1,09125
05:30	0	0,29	0,16	1,09125	0	0	0	0	0	1,09125
05:45	0	0,29	0,16	1,09125	0	0	0	0	0	1,09125
08:30	0,1179	0,575	0,41	1,42239	0	0	0	0	0	1,54025
06:15	0,1179	0,58	0,45	0,11539	0	0	0	0	0	0,23325
06:30	0,1179	0,58	0,45	1,01339	0	0	0	0	0	1,13125
06:45	0,1179	0,58	0,43	1,01339	0	0	0	0	0	1,13125
07:00	0,2357	0,68	0,61	0	0,17946	0	0	0	0	0,05625
07:15	0,2357	0,68	0,6118	0	0,17946	0	0	0	0	0,05625
07:30	0,2357	0,85	0,765	0	0,17946	0	0	0	0	0,05625
07:45	0,2357	0,85	0,765	0	0,17946	0	0	0	0	0,05625
08:00	0,3536	0,79	0,711	0	0,29732	0	0	0	0	0,05625
08:15	0,3536	0,68	0,6118	0	0,29732	0	0	0	0	0,05625
08:30	0,3536	0,68	0,6118	0	0,29732	0	0	0	0	0,05625
08:45	0,3536	0,68	0,6118	0	0,29732	0	0	0	0	0,05625
09:00	0,4714	0,66	0,594	0,00982	0	0	0	0	0	0,48125
09:15	0,4714	0,65	0,585	0,03482	0	0	0	0	0	0,50625
09:30	0,4714	0,65	0,585	0,06507	0	0	0	0	0	0,5365
09:45	0,4714	0,66	0,594	0,00982	0	0	0	0	0	0,48125

10:00	0,5893	0,69	0,621	0	0,53304	0	0	0	0	0,05625
10:15	0,5893	0,69	0,621	0	0,53304	0	0	0	0	0,05625
10:30	0,5893	0,69	0,621	0	0,53304	0	0	0	0	0,05625
10:45	0,5893	0,71	0,639	0	0,53304	0	0	0	0	0,05625
11:00	0,7071	0,715	0,6435	0	0,65089	0	0	0	0	0,05625
11:15	0,7071	0,745	0,6705	0	0,65089	0	0	0	0	0,05625
11:30	0,7071	0,75	0,675	0	0,65089	0	0	0	0	0,05625
11:45	0,7071	0,725	0,6525	0	0,65089	0	0	0	0	0,05625
12:00	0,825	0,77	0,693	0	0,76875	0	0	0	0	0,05625
12:15	0,825	0,734	0,6606	0	0,76875	0	0	0	0	0,05625
12:30	0,825	0,74	0,666	0	0,76875	0	0	0	0	0,05625
12:45	0,825	0,68	0,6118	0	0,34375	0	0	0	0	0,48125
13:00	0,7071	0,65	0,585	0	0,20089	0	0	0	0	0,50625
13:15	0,7071	0,65	0,585	0	0,02589	0	0	0	0	0,68125
13:30	0,7071	0,64	0,576	0	0,00089	0	0	0	0	0,70625
13:45	0,7071	0,64	0,576	0,22411	0	0	0	0	0	0,93125
14:00	0,5893	0,645	0,5805	0	0,05804	0	0	0	0	0,53125
14:15	0,5893	0,74	0,666	0	0,53304	0	0	0	0	0,05625
14:30	0,5893	0,89	0,801	0	0,53304	0	0	0	0	0,05625
14:45	0,5893	0,91	0,819	0	0,53304	0	0	0	0	0,05625
15:00	0,4714	0,68	0,6118	0	0,41518	0	0	0	0	0,05625
15:15	0,4714	0,68	0,6118	0	0,41518	0	0	0	0	0,05625
15:30	0,4714	0,68	0,6118	0	0,41518	0	0	0	0	0,05625
15:45	0,4714	0,72	0,648	0	0,41518	0	0	0	0	0,05625
16:00	0,3536	0,75	0,675	0	0,29732	0	0	0	0	0,05625
16:15	0,3536	0,68	0,6118	0	0,29732	0	0	0	0	0,05625
16:30	0,3536	0,68	0,6118	0	0,29732	0	0	0	0	0,05625
16:45	0,3536	0,68	0,6118	0	0,29732	0	0	0	0	0,05625
17:00	0,2357	0,68	0,6118	0	0,15446	0	0	0	0	0,08125
17:15	0,2357	0,84	0,756	0	0,17946	0	0	0	0	0,05625
17:30	0,2357	0,89	0,801	0	0,17946	0	0	0	0	0,05625
17:45	0,2357	0,79	0,711	0	0,17946	0	0	0	0	0,05625
18:00	0,1179	1,057	0,9513	0	0,06161	0	0	0	0	0,05625
18:15	0,1179	1,057	0,9513	0	0,06161	0	0	0	0	0,05625
18:30	0,1179	1,057	0,9513	0	0,06161	0	0	0	0	0,05625
18:45	0,1179	1,057	0,9513	0	0,06161	0	0	0	0	0,05625
19:00	0	1,24	1,116	0	0,69375	0,75	0	0	0	0,05625
19:15	0	1,25	1,125	0	0,69375	0,75	0	0	0	0,05625
19:30	0	1,245	1,1205	0	0,69375	0,75	0	0	0	0,05625
19:45	0	1,45	1,305	0	0,69375	0,75	0	0	0	0,05625
20:00	0	1,234	1,1106	0	0,69375	0,75	0	0	0	0,05625
20:15	0	1,245	1,1205	0	0,69375	0,75	0	0	0	0,05625
20:30	0	1,15	1,035	0	0	0,05625	0	0	0	0,05625
20:45	0	1,145	1,0305	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625

21:00	0	1,18	1,062	0	0,6256	0,681845238	0	0	0	0,05625
21:15	0	1,134	1,0206	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
21:30	0	1,07	0,963	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
21:45	0	0,789	0,7101	0,05625	0	0	0	0	0	0,05625
22:00	0	0,788	0,7092	0	0,69375	0	0	0,75	0	0,05625
22:15	0	0,745	0,6705	0	0,69375	0	0	0,75	0	0,05625
22:30	0	0,698	0,6282	0	0,69375	0	0	0,75	0	0,05625
22:45	0	0,68	0,612	0	0,24375	0	0	0,75	0	0,50625
23:00	0	0,68	0,6118	0	0,49375	0	0	0,75	0	0,25625
23:15	0	0,68	0,6118	0	0,69375	0	0	0,75	0	0,05625
23:30	0	0,456	0,4104	0	0,6256	0	0	0,68185	0	0,05625
23:45	0	0,455	0,4095	0	0	0	0	0,05625	0	0,05625