

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**GUSTAVO BRUINSMA**

**GERENCIAMENTO DE SISTEMAS DE CARREGAMENTO DE  
VEÍCULOS ELÉTRICOS INTEGRADOS À MICRORREDES COM  
GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**

**DISSERTAÇÃO**

**PATO BRANCO**

**2023**

**GUSTAVO BRUINSMA**

**GERENCIAMENTO DE SISTEMAS DE CARREGAMENTO DE  
VEÍCULOS ELÉTRICOS INTEGRADOS À MICRORREDES  
COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**

**Management Charging Systems for Electric Vehicles Integrated  
into Microgrids with Distributed Generation**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Emerson Giovani Carati

**PATO BRANCO**

**2023**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es).  
Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



GUSTAVO BRUINSMA

**GERENCIAMENTO DE SISTEMAS DE CARREGAMENTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS INTEGRADOS À  
MICRORREDES COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Sistemas E Processamento De Energia.

Data de aprovação: 23 de Outubro de 2023

Dr. Emerson Giovani Carati, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Carlos Marcelo De Oliveira Stein, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Cassiano Rech, Doutorado - Universidade Federal de Santa Maria (Ufsm)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 23/10/2023.

Dedico este trabalho à minha família,  
por todo o apoio e incentivo.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família pelos ensinamentos e por todo apoio e suporte, fornecendo palavras de incentivo durante minha trajetória.

Agradeço em especial ao professor Dr. Emerson Giovani Carati pela orientação, por todo auxílio e dedicação com valorosas contribuições para aperfeiçoar meu trabalho e suporte diante às dificuldades enfrentadas durante o processo.

Agradeço aos professores Dr. Carlos Marcelo de Oliveira Stein, Dr. Cassiano Rech e Dr. Jean Patric da Costa por aceitarem participar da banca e por suas contribuições.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) pela oportunidade de realizar o curso de pós-graduação.

Agradeço aos amigos e colegas do PPGEE pelos conhecimentos técnicos compartilhados e pelos momentos de descontração.

À Deus, por me guiar nesse caminho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da UTFPR, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), da Fundação Araucária (FA) e da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP).

## RESUMO

BRUINSMA, Gustavo. **Gerenciamento de Sistemas de Carregamento de Veículos Elétricos Integrados à Microrredes com Geração Distribuída**. 2023. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2023.

Este trabalho propõe um sistema de gerenciamento de estações de carregamento de veículos elétricos integrados à microrredes com geração de energia renovável fotovoltaica. Inicialmente apresenta-se uma revisão da literatura dos principais assuntos utilizados no desenvolvimento do presente trabalho. Também são apresentados e discutidos os problemas e benefícios na rede referentes ao carregamento de veículos elétricos. Em seguida são apresentadas a estrutura da microrrede utilizada nesse trabalho e a modelagem dos elementos que a compõem, sendo eles: arranjo de painéis fotovoltaicos, cargas de usuário, sistema de armazenamento de energia em baterias e estacionamento de veículos elétricos. Desenvolveu-se uma estratégia de gerenciamento de energia para o carregamento dos veículos elétricos e o sistema de baterias com o intuito de atender as preferências de usuários EV e proprietário da microrrede com sistemas de recarga EV. O algoritmo de gerenciamento proposto é baseado em regras que oferecem aos proprietários de EV diferentes modos de carregamento, levando em consideração a demanda de carga, geração fotovoltaica e os custos de energia em uma microrrede com geração distribuída. O principal objetivo da estratégia proposta é oferecer aos usuários diferentes modos de carregamento de EVs e atender aos seus requisitos de tempo e custo de carregamento, considerando prioridades e aspectos que influenciam no fornecimento da potência de carregamento. Posteriormente, são incorporados controladores de lógica fuzzy ao gerenciador baseado em regras nos modos de carregamento ECO e V2G, e na operação do sistema de armazenamento de energia de baterias. Fez-se simulações do sistema de gerenciamento para carregamento de veículos elétricos para diferentes cenários de geração fotovoltaica, analisando e discutindo os resultados em detalhes. Através dos resultados obtidos foi possível comprovar o funcionamento do sistema de gerenciamento proposto para o carregamento de veículos elétricos, assim como o fornecimento de energia à microrrede.

**Palavras-chave:** Veículos Elétricos. Energias Renováveis. Redes Inteligentes. Microrredes. Gerenciamento de Energia.

## ABSTRACT

BRUINSMA, Gustavo. **Management Charging Systems for Electric Vehicles Integrated into Microgrids with Distributed Generation**. 2023. 97 p. Dissertation (Master's Degree in Electrical Engineering) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2023.

This work proposes a management system for electric vehicle charging stations integrated into microgrids with photovoltaic renewable energy generation. Initially, a literature review of the main topics used in developing this work is presented. The problems and benefits of charging electric vehicles on the grid are also presented and discussed. This is followed by a presentation of the microgrid structure used in this work and the modeling of the elements that make it up: the arrangement of photovoltaic panels, user loads, the battery energy storage system, and electric vehicle parking. An energy management strategy was developed for charging electric vehicles and the battery system to meet the preferences of EV users and microgrid owners with EV charging systems. The proposed management algorithm is based on rules that offer EV owners different charging modes, considering load demand, photovoltaic generation, and energy costs in a microgrid with distributed generation. The main objective of the proposed strategy is to offer users different EV charging modes and meet their charging time and cost requirements, considering priorities and aspects that impact the supply of charging power. Subsequently, fuzzy logic controllers are incorporated into the rule-based manager in ECO and V2G charging modes and in the operation of the battery energy storage system. Simulations of the electric vehicle charging management system for different photovoltaic generation scenarios were carried out, analyzing and discussing the results in detail. The results obtained made it possible to verify the operation of the proposed management system for charging electric vehicles and supplying energy to the microgrid.

**Keywords:** Electric Vehicles. Renewable Energies. Smart Grids. Microgrids. Energy Management.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura de uma microrrede CA com estação de carregamento EV. . . . .	24
Figura 2 – Configuração geral de carregador unidirecional e bidirecional. . . . .	29
Figura 3 – Estrutura de microrrede com estacionamento de EVs, geração PV distribuída e cargas conectadas à rede elétrica externa. . . . .	31
Figura 4 – Regiões de operação do gerenciador. . . . .	35
Figura 5 – Estrutura simplificada da microrrede, agrupando os EVs por modo de carregamento e indicando os elementos gerenciados e não gerenciados. . . . .	36
Figura 6 – Arquitetura do sistema de gerenciamento. . . . .	44
Figura 7 – Fluxograma de operação do sistema de gerenciamento das potências de operação dos modos de carregamento EV e do BESS. . . . .	45
Figura 8 – Arquitetura do sistema de inferência fuzzy. . . . .	52
Figura 9 – FLC para o modo ECO. . . . .	55
Figura 10 – Funções de pertinência do FLC para o modo ECO das entradas (a) $P_{con}$ , (b) $r_G$ e da saída (c) $P_{EVSE_E}$ . . . . .	56
Figura 11 – Sistema de inferência fuzzy em árvore para modo V2G. . . . .	57
Figura 12 – Funções de pertinência do FLC1 para o modo V2G das entradas (a) $P_{con}$ , (b) $r_G$ e da saída (c) $P_{EVSE1}$ . . . . .	58
Figura 13 – Funções de pertinência do FLC2 para o modo V2G da entrada (a) $SOC$ e da saída (b) $P_{EVSEv2g}$ . . . . .	59
Figura 14 – Sistema de inferência fuzzy em árvore para operação do BESS. . . . .	60
Figura 15 – Funções de pertinência do FLC1 para o BESS das entradas (a) $P_{con}$ , (b) $r_G$ e da saída (c) $P_{bessflc1}$ . . . . .	60
Figura 16 – Funções de pertinência do FLC2 para o BESS da entrada (a) $SOC$ e da saída (b) $P_{bess}$ . . . . .	61
Figura 17 – Perfis da potência de geração PV ( $P_{PV}$ ), demanda de carga ( $P_{load}$ ) e tarifa de energia ( $r_G$ ). . . . .	64
Figura 18 – Impacto do carregamento de EVs na demanda da microrrede. Sem EMS e BESS ( $P_{grid [conv]}$ ). Com EMS e sem BESS ( $P_{grid [EMS]}$ ). Com EMS e BESS ( $P_{grid [EMS+BESS]}$ ). . . . .	64
Figura 19 – Potências dos modos de carregamento dos EVs conectados à microrrede. . . . .	65
Figura 20 – Potência de operação e SOC do BESS na microrrede. . . . .	66
Figura 21 – Potências e SOCs dos EVs conectados no modo ECO. . . . .	67
Figura 22 – Potências e SOCs dos EVs conectados no modo V2G. . . . .	68
Figura 23 – Potências dos modos de carregamento EV e potências resultantes no ponto de conexão comum. . . . .	68
Figura 24 – Potências na microrrede: (a) Potências dos modos de carregamento EV. (b) Potências resultantes no ponto de conexão comum dos elementos da microrrede. (c) Potências de carregamento dos EVs. . . . .	70
Figura 25 – SOCs dos EVs nos modos ULTRA (vermelho) e FAST (amarelo). . . . .	71
Figura 26 – Irradiância solar incidente sobre o arranjo de painéis solares e geração PV no cenário 1. . . . .	72
Figura 27 – Potências dos modos de carregamento EV e potências resultantes no ponto de conexão comum no cenário 1. . . . .	73

Figura 28 – Potências dos modos de carregamento dos EVs conectados à microrrede no cenário 1. . . . .	74
Figura 29 – Potência de operação e SOC do BESS na microrrede no cenário 1. . . . .	74
Figura 30 – Potências e SOC's dos EVs conectados no modo ECO no cenário 1. . . . .	75
Figura 31 – Potências e SOC's dos EVs conectados no modo V2G no cenário 1. . . . .	76
Figura 32 – Irradiância solar incidente sobre o arranjo de painéis solares e geração PV no cenário 2. . . . .	77
Figura 33 – Potências dos modos de carregamento EV e potências resultantes no ponto de conexão comum no cenário 2. . . . .	77
Figura 34 – Potências dos modos de carregamento dos EVs conectados à microrrede no cenário 2. . . . .	78
Figura 35 – Potência de operação e SOC do BESS na microrrede no cenário 2. . . . .	78
Figura 36 – Potências e SOC's dos EVs conectados no modo ECO no cenário 2. . . . .	79
Figura 37 – Potências e SOC's dos EVs conectados no modo V2G no cenário 2. . . . .	80
Figura 38 – Irradiância solar incidente sobre o arranjo de painéis solares e geração PV no cenário 3. . . . .	81
Figura 39 – Potências dos modos de carregamento EV e potências resultantes no ponto de conexão comum no cenário 3. . . . .	81
Figura 40 – Potências dos modos de carregamento dos EVs conectados à microrrede no cenário 3. . . . .	82
Figura 41 – Potência de operação e SOC do BESS na microrrede no cenário 3. . . . .	83
Figura 42 – Potências e SOC's dos EVs conectados no modo ECO no cenário 3. . . . .	83
Figura 43 – Potências e SOC's dos EVs conectados no modo V2G no cenário 3. . . . .	84
Figura 44 – Potência da microrrede utilizando o gerenciamento baseado em regras e o gerenciamento com lógica fuzzy. . . . .	85
Figura 45 – Potência do modo ECO utilizando o gerenciamento baseado em regras e o gerenciamento com lógica fuzzy. . . . .	86
Figura 46 – Potência do modo V2G utilizando o gerenciamento baseado em regras e o gerenciamento com lógica fuzzy. . . . .	86
Figura 47 – Potência e SOC do BESS utilizando o gerenciamento baseado em regras e o gerenciamento com lógica fuzzy. . . . .	87

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Especificações técnicas dos padrões IEC 61851 e SAE J1772. . . . .	28
Tabela 2	–	Regras para determinar a potência de carregamento EV do modo ECO. . . . .	56
Tabela 3	–	Regras FLC1 para determinar a potência de carregamento e descarregamento $P_{EVSE_{flc1}}$ do EV V2G. . . . .	58
Tabela 4	–	Regras FLC2 para determinar a potência de carregamento e descarregamento $P_{EVSE_{v2g}}$ do EV V2G. . . . .	59
Tabela 5	–	Regras FLC1 para determinar a potência de carregamento e descarregamento $P_{bess_{flc1}}$ do BESS. . . . .	61
Tabela 6	–	Regras FLC2 para determinar a potência de carregamento e descarregamento $P_{bess}$ do BESS. . . . .	61
Tabela 7	–	Comparação entre o gerenciamento convencional e utilizando lógica fuzzy no carregamento de EVs. . . . .	85

## LISTA DE SIGLAS

BESS	Sistema de Armazenamento de Energia em Baterias ( <i>Battery Energy Storage System</i> )
BMS	Sistema de Gerenciamento de Bateria ( <i>Battery Management System</i> )
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
FIS	Sistema de Inferência Fuzzy ( <i>Fuzzy Inference System</i> )
FLC	Controlador de Lógica Fuzzy ( <i>Fuzzy Logic Controller</i> )
EMS	Sistema de Gerenciamento de Energia ( <i>Energy Management System</i> )
ESS	Sistema de Armazenamento de Energia ( <i>Energy Storage System</i> )
EV	Veículo Elétrico ( <i>Electric Vehicle</i> )
EV-CSMS	Sistema de Gerenciamento de Estações de Carregamento de Veículos Elétricos ( <i>EV Charging Station Management System</i> )
EVSE	Equipamento de Carregamento de Veículos Elétricos ( <i>Electric Vehicle Supply Equipment</i> )
GD	Geração Distribuída
IEA	Agência Internacional de Energia ( <i>International Energy Agency</i> )
PV	Fotovoltaica ( <i>Photovoltaic</i> )
SCS	Sistema de Controle Supervisório
SOC	Estado de Carga ( <i>State of Charge</i> )
V2G	Veículo-para-Rede ( <i>Vehicle-to-Grid</i> )
V2V	Veículo-para-Veículo ( <i>Vehicle-to-Vehicle</i> )

## LISTA DE SÍMBOLOS

$SOC_{EV}$	Estado de carga do EV
$\eta_{EVSE}$	Eficiência do conversor para carregamento e descarregamento
$E_{bat}$	Capacidade total da bateria do veículo elétrico
$P_{EVSE}$	Potência fornecida pela estação de carregamento
$\Delta t$	Intervalo de tempo em horas
$t$	Tempo atual dentro de todo o período de análise [0, N]
$N$	Número total de amostras
$k$	Amostra atual
$i$	ID da estação de carregamento
$SOC_{bess}$	Estado de carga do BESS
$E_{bess}$	Capacidade total do banco de baterias do sistema
$\eta_{bess}$	Eficiência do conversor para carga ou descarga do BESS
$P_{bess}$	Potência de carga fornecida ao BESS
$\eta_p$	eficiência do módulo fotovoltaico
$A_{PV}$	área de superfície ocupada pelo painel fotovoltaico
$I_{PV}$	irradiância solar incidente no módulo fotovoltaico
$P_{PV}$	Potência total da geração PV
$\eta_{PV}$	eficiência dos conversores no arranjo PV
$p$	módulo PV
$N_{PV}$	número máximo de painéis solares instalados
$P_{grid}$	Potência líquida da microrrede
$P_{EVSE_{tot}}$	Potência total dos modos de carregamento EV
$P_{con}$	Potência líquida entre a demanda das cargas e geração PV
$P_{load}$	Potência total de demanda das cargas
$P_{lim}$	Demanda de potência contratada pela microrrede
$u$	Índice para os EVs no modo ULTRA
$f$	Índice para os EVs no modo FAST
$e$	Índice para os EVs no modo ECO
$v$	Índice para os EVs no modo V2G
$K_{lim,EV_U}$	Índice de limitação da potência do EV no modo ULTRA
$P_{nom,EV_U}$	Potência nominal de carregamento do EV no modo ULTRA
$P_{lim,EV_U}$	Potência limitada de carregamento do EV no modo ULTRA
$P_U$	Potência total do modo ULTRA
$P_{EV_U\{u\}}$	Potência de carregamento do $EV_u$ no modo ULTRA

$n_{EV_U}$	Número total de EVs conectados no modo ULTRA
$K_{lim,EV_F}$	Índice de limitação da potência do EV no modo FAST
$P_{nom,EV_F}$	Potência nominal de carregamento do EV no modo FAST
$P_{lim,EV_F}$	Potência limitada de carregamento do EV no modo FAST
$P_F$	Potência total do modo FAST
$P_{EV_U\{f\}}$	Potência de carregamento do $EV_f$ no modo FAST
$n_{EV_F}$	Número total de EVs conectados no modo FAST
$r_G$	Tarifa de energia
$P_{calc,EV_E\{e\}}$	Potência de carregamento calculada do EV no modo ECO
$P_{max,EV_E\{e\}}$	Potência máxima de carregamento do EV no modo ECO
$EV_E\{e\}$	Identificação do EV conectado no modo ECO
$K_{lim,EV_E}$	Índice de limitação da potência do EV no modo ECO
$P_{EV_E}$	Potência de carregamento do EV no modo ECO
$P_{lim,EV_E}$	Potência limitada de carregamento do EV no modo ECO
$P_E$	Potência total do modo ECO
$P_{EV_E\{e\}}$	Potência de carregamento do $EV_e$ no modo ECO
$n_{EV_E}$	Número total de EVs conectados no modo ECO
$P_{calc,EV_{v2g}\{v\}}$	Potência de carregamento calculada do EV no modo V2G
$P_{max,EV_{v2g}\{v\}}$	Potência máxima de carregamento do EV no modo V2G
$EV_{v2g}\{v\}$	Identificação do EV conectado no modo V2G
$K_{lim,EV_{v2g}}$	Índice de limitação da potência do EV no modo V2G
$P_{EV_{v2g}}^+$	Potência de carregamento do EV no modo V2G
$P_{lim,EV_{v2g}}$	Potência limitada de carregamento do EV no modo V2G
$P_{v2g}^+$	Potência total de carregamento do modo V2G
$P_{EV_{v2g}\{v\}}^+$	Potência de carregamento do $EV_v$ no modo V2G
$n_{EV_{v2g}}$	Número total de EVs conectados no modo V2G
$P_{v2g,tot}^-$	Potência total de descarregamento do modo V2G
$P_{v2g,EV}^-$	Potência de descarregamento de cada EV no modo V2G
$mode$	Variável que identifica o modo do EV no gerenciador
$P_{grid_{est}}$	Potência da microrrede estimada para o cálculo das potências dos EVs
$P_{U_{est}}$	Potência estimada do modo ULTRA
$P_{F_{est}}$	Potência estimada do modo FAST
$P_{E_{est}}$	Potência estimada do modo ECO
$P_{v2g_{est}}$	Potência estimada do modo V2G
$P_{est,EV_U\{u\}}$	Potência estimada do EV no modo ULTRA
$SOC_{est,EV_U\{u\}}$	SOC estimado do EV no modo ULTRA
$P_{est,EV_F\{f\}}$	Potência estimada do EV no modo FAST
$SOC_{est,EV_F\{f\}}$	SOC estimado do EV no modo FAST

$SOC_{est, EV_{E\{e\}}}$	SOC estimado do EV no modo ECO
$SOC_{est, EV_{v2g\{v\}}}$	SOC estimado do EV no modo V2G
$P_{EVSE}$	Potência calculada pelo FLC para o EV ECO
$P_{EVSEflc1}$	Potência calculada pelo FLC1 para o EV V2G
$P_{EVSEv2g}$	Potência calculada pelo FLC2 para o EV V2G
$P_{bessflc1}$	Potência calculada pelo FLC1 para o BESS
$P_{bess}$	Potência calculada pelo FLC2 para o BESS

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>16</b>
1.1	CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO . . . . .	18
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO . . . . .	20
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b> . . . . .	<b>21</b>
2.1	INTRODUÇÃO . . . . .	21
2.2	GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA RENOVÁVEL E VEÍCULOS ELÉTRICOS . . . . .	21
2.3	REDES INTELIGENTES E MICRORREDES . . . . .	22
2.4	VEÍCULOS ELÉTRICOS . . . . .	25
2.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO . . . . .	29
<b>3</b>	<b>SISTEMA DE GERENCIAMENTO PARA CARREGAMENTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS EM MICRORREDES COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA</b> . . . . .	<b>30</b>
3.1	INTRODUÇÃO . . . . .	30
3.2	ESTRUTURA DA MICRORREDE COM ESTACIONAMENTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS . . . . .	30
3.2.1	Modelagem dos Veículos Elétricos . . . . .	30
3.2.2	Modelagem do Sistema de Armazenamento de Energia em Baterias . . . . .	32
3.2.3	Modelagem da Geração Fotovoltaica . . . . .	33
3.2.4	Modelagem da Rede Elétrica . . . . .	33
3.3	GERENCIAMENTO DAS ESTAÇÕES DE CARREGAMENTO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS . . . . .	34
3.3.1	Modo ULTRA . . . . .	35
3.3.2	Modo FAST . . . . .	37
3.3.3	Modo ECO . . . . .	38
3.3.4	Modo V2G . . . . .	40
3.3.5	Operação do Sistema de Armazenamento de Energia de Baterias . . . . .	43
3.4	SISTEMA DE GERENCIAMENTO BASEADO EM REGRAS . . . . .	43
3.5	SISTEMAS BASEADOS EM LÓGICA FUZZY PARA CARREGAMENTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS . . . . .	51
3.5.1	Sistema de Inferência Fuzzy . . . . .	54
3.5.2	Controlador de Lógica Fuzzy do Modo ECO . . . . .	54
3.5.3	Controlador de Lógica Fuzzy do Modo V2G . . . . .	57
3.5.4	Controlador de Lógica Fuzzy para Operação do BESS . . . . .	59
3.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO . . . . .	62
<b>4</b>	<b>ANÁLISE E VERIFICAÇÃO DO GERENCIAMENTO DE SISTEMAS DE CARREGAMENTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS</b> . . . . .	<b>63</b>
4.1	INTRODUÇÃO . . . . .	63
4.2	SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE GERENCIAMENTO BASEADO EM REGRAS . . . . .	63
4.3	SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE GERENCIAMENTO COM LÓGICA FUZZY . . . . .	71

4.3.1	Resultados de Simulação para o Cenário 1 . . . . .	72
4.3.2	Resultados de Simulação para o Cenário 2 . . . . .	76
4.3.3	Resultados de Simulação para o Cenário 3 . . . . .	80
4.4	COMPARAÇÃO DAS ESTRATÉGIAS DE GERENCIAMENTO	85
4.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO . . . . .	88
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES . . . . .</b>	<b>89</b>
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS . . . . .	90
5.2	TRABALHOS PUBLICADOS . . . . .	90
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>91</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, há um foco crescente em questões ambientais e nos avanços tecnológicos, que resultaram em iniciativas e legislações globais com o objetivo de reduzir o uso de combustíveis fósseis. O intuito é diminuir as emissões de gases de efeito estufa e promover o uso de fontes de energia renováveis (KUMAR *et al.*, 2017; MOZAFAR *et al.*, 2018a; BENYSEK *et al.*, 2022; NOGUEIRA *et al.*, 2022; GARCÍA-TRIVIÑO *et al.*, 2023). Consequentemente, nos anos recentes, os veículos elétricos, do inglês *Electric Vehicles (EVs)*, têm atraído muita atenção, e vários equipamentos de carregamento de veículos elétrico, do inglês *electric vehicle supply equipment (EVSE)*, foram implantados (BENYSEK *et al.*, 2022; LI *et al.*, 2020; AHMADIAN *et al.*, 2018; DAS *et al.*, 2020), onde uma infraestrutura de carregamento acessível é essencial para a adoção generalizada de EVs (NOGUEIRA *et al.*, 2022; WANG *et al.*, 2020; LEONE *et al.*, 2022). As projeções em larga escala para a eletrificação do transporte na Europa, por exemplo, mostram que poderá haver de 50 a 70 milhões de EVs circulando na Europa até 2030. Portanto, essa quantidade de EVs exigiria várias novas estações de carregamento, tanto unidirecionais quanto bidirecionais (WILCZEK, 2021).

À medida que a quantidade de EVs aumenta, também aumenta a demanda de energia para carregar os EVs. O crescimento dessa demanda afetará o pico de carga do sistema de potência e a capacidade limitada da rede de distribuição não está preparada para a carga adicional de uma infraestrutura de EVs generalizada (BENYSEK *et al.*, 2022; NOGUEIRA *et al.*, 2022; LI *et al.*, 2020; LEONE *et al.*, 2022; GOLDSTEIN, 2022). Além disso, a alta penetração de fontes de energia renováveis na rede elétrica também aumentará as incertezas do sistema e poderá diminuir a confiabilidade (WANG *et al.*, 2020). Por outro lado, as concessionárias de energia elétrica precisam estabilizar suas redes devido a inserção e operação de fontes de energia renovável intermitentes, como a eólica e a solar (GOLDSTEIN, 2022).

Em conjunto com a geração renovável e no caso de interesse dos usuários de EVs, as estações de carregamento conectadas a EVs ociosos no estacionamento podem servir como backup de energia para uma microrrede, armazenando por meio do carregamento das baterias dos EVs a energia renovável gerada. Então, posteriormente, a energia armazenada nas baterias pode ser utilizada quando a demanda exceder a capacidade de fornecimento. O

processo de utilização de EVs como um serviço ancilar é possível devido à tecnologia vehicle-to-grid (V2G), também conhecida como carregamento inteligente de EVs (AHMADIAN *et al.*, 2018; GOLDSTEIN, 2022; MWASILU *et al.*, 2014; SALVATTI *et al.*, 2020; GAMIL *et al.*, 2022). Portanto, os EVs podem participar da operação da microrrede e aumentar a estocasticidade da energia gerada por fontes renováveis (KHOOBAN, 2018; ESEYE *et al.*, 2019).

As estações de carregamento que operam no modo V2G podem contribuir para tornar a rede elétrica mais resiliente, fornecendo energia durante os horários de pico, mesmo quando os recursos de energia renovável não estão disponíveis. Portanto, acabam ajudando a suprir a demanda de energia, equilibrar a potência da rede, regular a frequência da rede e atingir as metas de energia renovável dos países (DAS *et al.*, 2020; WANG *et al.*, 2020; GAMIL *et al.*, 2022; TAN *et al.*, 2016a; FAVERI *et al.*, 2020; WU; LIN, 2021). Além disso, nesse mesmo cenário, os sistemas de armazenamento de energia (ESS) também são benéficos, armazenando a energia da geração renovável e contribuindo com serviços ancilares (DAS *et al.*, 2020; WANG *et al.*, 2020; GAMIL *et al.*, 2022; FAVERI *et al.*, 2020).

Um dos problemas mais críticos para o uso da tecnologia V2G é a degradação da bateria do EV, que está diminuindo e mudando para um cenário mais promissor (DUMIAK, 2022). Gandhi, em (GANDHI; WHITE, 2021), modelou a economia do V2G e mostrou que os custos de degradação da bateria do EV poderiam ser minimizados com o uso do V2G. Além disso, Gandhi também observou que os custos da bateria diminuiriam drasticamente ao longo do tempo, apresentando no ano de 2010 um valor de US\$1.000 por kWh e caindo para aproximadamente US\$140 por kWh no ano de 2020, tornando viável o uso do V2G (DUMIAK, 2022).

O gerenciamento do carregamento de veículos elétricos é uma maneira de integrar as estações de carregamento à rede tornando os EVs um recurso de energia. Os sistemas de gerenciamento de energia, do inglês *energy management system* (EMS), são necessários para usar a energia de forma eficaz e tornar o sistema confiável (WANG *et al.*, 2020; GAMIL *et al.*, 2022; FAVERI *et al.*, 2020; BILBAO *et al.*, 2022). A coordenação e o gerenciamento de energia das estações de carregamento para integrar os EVs às redes elétricas vêm sendo investigados por pesquisadores nos últimos anos. Benysek *et al.* (2022) propõem um algoritmo de coordenação de EV capaz de garantir que todos os EVs conectados no estacionamento considerado fossem carregados até o horário de partida definido pelo

usuário, controlando a potência de carregamento e descarregamento de cada EV. Li *et al.* (2020) apresentam um método de gerenciamento de energia para operar estações de carregamento de EVs e sistemas de distribuição de eletricidade. Já Salvatti *et al.* (2020) apresenta um carregamento ótimo com base em programação dinâmica e dados preditivos. Enquanto que Gamil *et al.* (2022) mostra que a integração de EVs e ESS, ambos controlados, reduz os custos totais do sistema e as emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera.

A coordenação e o planejamento do carregamento de EVs conectados em estações de carregamento são realizados em vários estudos para deslocar a curva de carregamento, diminuindo a demanda de pico de potência na rede (BENYSEK *et al.*, 2022; USTUN *et al.*, 2013; MOHAMED *et al.*, 2014; TENG *et al.*, 2017; NOUR *et al.*, 2019). Esses estudos mostram os problemas que a alta penetração de EVs pode ocasionar na rede e as formas de mitigar os problemas causados. No entanto, o planejamento do carregamento desses veículos com base no comportamento dos proprietários de EVs, e nas previsões de demandas e geração de energia traz incertezas, conforme mostrado por Wang em (WANG *et al.*, 2020).

Neste trabalho é proposta uma estratégia de carregamento de EVs baseada em premissas para os modos de carregamento de EVs, considerando o preço da energia, a geração fotovoltaica e a demanda de carga. Os modos de carregamento de EVs são definidos como uma preferência do usuário, que pode selecionar carregamento ultrarrápido, rápido, econômico ou V2G. Cada modo tem suas próprias características com relação à prioridade de carregamento, nível de potência fornecido pelo carregador e custo de carregamento. A partir disso, desenvolveu-se um gerenciador de sistema de carregamento de EVs baseado em regras. O gerenciamento baseado em regras também é utilizado como base para projetar controladores de lógica fuzzy para determinar as potências EV nos modos ECO e V2G, atendendo as preferências dos usuários, e para a operação do sistema de armazenamento de energia em baterias, do inglês *battery energy storage system* (BESS), presente na microrrede.

## 1.1 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

Com base nos trabalhos estudados, levantou-se um conjunto de premissas acerca do carregamento de EVs em microrredes e das diferentes maneiras de gerenciamento de energia para tal finalidade. Portanto, com base nas premissas elaboradas criou-se um

gerenciamento para o carregamento de EVs baseado em regras, abordando diferentes modos de carregamento e visando diferentes preferências de usuários EV. Pontos importantes que valem destaque na estratégia de gerenciamento elaborada são o gerenciamento levando em consideração o nível de potência exigida pelos diferentes modos de carregamento EV, excedente de geração PV e preço da energia se correlacionando, e a demanda de energia contratada pela microrrede.

A estratégia de gerenciamento de sistemas de carregamento de EVs integrados à uma microrrede e com fontes de geração distribuída (GD) pode ser estendida para diferentes cenários, como a integração do sistema em domicílios, parques industriais, shoppings, universidades e comunidades. Além disso, vale destacar que o foco desse trabalho é a integração e gerenciamento de estações de carregamento de EVs na microrrede, sendo assim a característica de operação ilhada da microrrede não é abordada. Portanto, nesse estudo a microrrede opera conectada a rede elétrica externa durante todo período de análise.

Além disso, objetivando o melhor funcionamento e abrangendo diferentes cenários de geração PV para o sistema de gerenciamento proposto, utilizou-se um sistema de inferência fuzzy para a operação dos controladores de lógica fuzzy aplicados. Tais controladores foram projetados para calcular e definir as potências dos modos ECO e V2G, assim como a potência de operação do BESS, obedecendo as premissas adotadas e atendendo as preferências dos proprietários de EVs e da microrrede.

Comparando as técnicas utilizadas na estratégia de gerenciamento de carregamento de EVs proposta por Salvatti (2020), o sistema de gerenciamento proposto neste trabalho utiliza lógica fuzzy para determinar a potência de destinada aos EVs nos modos ECO e V2G, enquanto que o autor citado faz uso da programação dinâmica. Ao utilizar programação dinâmica é possível otimizar as potências de carregamento dos EVs considerando previsões de demanda e geração de energia, entretanto a um custo de tempo maior para efetuar os cálculos e maior uso de memória. Aplicando lógica fuzzy, apesar de não obter uma resposta ótima igual à da programação dinâmica e não sendo considerados dados de previsão, é possível reduzir o tempo de resposta do gerenciador e, conseqüentemente, aumentar o número de estações de carregamento de EVs controladas pelo gerenciador. Outra diferença entre os trabalhos é a inclusão de um BESS à microrrede, que possui as potências de carregamento e descarregamento definidas também pelo sistema de inferência fuzzy.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

No Capítulo 2 são apresentados os conceitos envolvendo a geração de energia elétrica, redes inteligentes, microrredes e o carregamento de veículos elétricos.

No Capítulo 3 são apresentadas a estrutura da microrrede com sistemas de carregamento de veículos elétricos e a modelagem dos elementos que a compõe. Também é apresentado o gerenciamento do carregamento dos veículos elétricos, onde é abordado o gerenciador baseado em regras. Também são apresentadas estratégias de carregamento utilizando sistemas de lógica fuzzy, e um gerenciador utilizando lógica fuzzy é proposto.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos de simulação em *software* computacional e a análise do sistema de gerenciamento proposto para o carregamento de veículos elétricos em microrredes.

Por fim, no Capítulo 5 é apresentada a conclusão do trabalho e apontados os resultados obtidos ao final da pesquisa.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são abordados os conceitos que envolvem a geração de energia elétrica renovável e o carregamento de veículos elétricos, destacando a capacidade desses veículos em operar utilizando o conceito V2G. O conceito e utilização de microrredes e redes inteligentes também é abordado, enfatizando a sua relação com estações de carregamento de veículos elétricos

### 2.2 GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA RENOVÁVEL E VEÍCULOS ELÉTRICOS

O uso de fontes de energia renovável para geração de energia elétrica vem aumentando cada vez mais devido as preocupações atuais com os danos causados ao meio ambiente pelas fontes não renováveis, as quais colaboram em grande escala para o aquecimento global e efeito estufa, e também pelo esgotamento das fontes de energia (KUMAR *et al.*, 2017; GAMIL *et al.*, 2022). As fontes de energia renováveis nos últimos anos ganharam mais espaço no cenário mundial quando o assunto é gerar energia elétrica com impacto ambiental reduzido (LIBICH *et al.*, 2018; GAMIL *et al.*, 2022). Isso impulsionou a área de energias renováveis, mudando o cenário energético para diminuir a poluição. Ainda, tal motivo desencadeou investimentos em microgerações residenciais, sendo mais comum as gerações solares (térmicas e fotovoltaicas), e juntamente, a utilização de meios de transporte que emitem menos poluentes (POSSAMAI, 2018; LIBICH *et al.*, 2018; MOZAFAR *et al.*, 2018b).

Com o aumento do uso de fontes renováveis para a geração de energia elétrica, a utilização de EVs também vem crescendo ao longo dos últimos tempos. Isso deve-se ao fato das preocupações com a poluição causada pelos veículos movidos à combustão interna, que emitem gases que contribuem de forma significativa para o efeito estufa, reduzindo também a qualidade do ar urbano (CHEN *et al.*, 2013; GUARNIERI, 2012; AHMADIAN *et al.*, 2018; DAS *et al.*, 2020). Tais preocupações também fizeram com que os fabricantes de veículos estabelecessem metas de redução na produção de veículos à combustão interna e aumentassem os incentivos na fabricação de EVs, a qual vem crescendo a cada ano (DAS

*et al.*, 2020).

Os EVs estão se tornando a opção mais prática e promissora para diminuir a poluição no setor dos transportes. Isso devido sua alta eficiência energética na conversão de energia elétrica em energia cinética, ocasionando uma diminuição no consumo de combustíveis fósseis, e assim reduzindo custos e poluições (MWASILU *et al.*, 2014; AHMADIAN *et al.*, 2018; MOZAFAR *et al.*, 2018b; REDDY; NATARAJAN, 2018).

Em conjunto com a geração renovável, as estações de carregamento conectadas à EVs podem servir como backup de energia para a rede elétrica, ou seja, armazenar a energia proveniente de fontes renováveis carregando os EVs. Em caso de emergência ou falha na rede, tais EVs podem injetar a energia armazenada de volta para a rede elétrica, processo conhecido como veículo para a rede, do inglês *vehicle-to-grid* (V2G). Portanto, o V2G se refere ao uso bidirecional da energia armazenada nos EVs, tornando-os sistemas de armazenamento de energia alternativos, servindo a rede elétrica como uma fonte de energia distribuída (MWASILU *et al.*, 2014; FERNANDES, 2016; AHMADIAN *et al.*, 2018; FAVERI *et al.*, 2020).

Entretanto, uma alta inserção de EVs na rede elétrica exigirá uma demanda de carga estocástica, podendo comprometer o abastecimento de energia e causar problemas ao sistema e, conseqüentemente, prejudicar a qualidade de energia e confiabilidade da rede (WANG *et al.*, 2020; BENYSEK *et al.*, 2022). Além disso, empresas de energia constataram que mesmo uma baixa penetração de carregamento de EVs pode impactar nas redes de energia (TENG *et al.*, 2017). Portanto, há a necessidade de um sistema de gerenciamento de demanda para que seja feita a troca de energia entre rede elétrica e os sistemas de carregamento dos EVs, de maneira eficiente e sem comprometer a qualidade de energia do sistema elétrico (MOZAFAR *et al.*, 2018b; AHMADIAN *et al.*, 2018).

### 2.3 REDES INTELIGENTES E MICRORREDES

A fim de integrar os elementos dos sistemas de distribuição e transmissão de energia elétrica de forma a torná-los mais eficientes, sustentáveis e confiáveis, cresceu o interesse na implementação de redes inteligentes, do inglês *smart grids*. A utilização de redes inteligentes ajuda a melhorar o fluxo de energia entre os elementos de geração, distribuição e armazenamento. Isso é possível através de equipamentos de medição, monitoramento e gerenciamento dos elementos conectados à microrredes (MWASILU *et al.*, 2014;

AHMADIAN *et al.*, 2018; NOUR *et al.*, 2019; SALVATTI, 2020; FAVERI *et al.*, 2020).

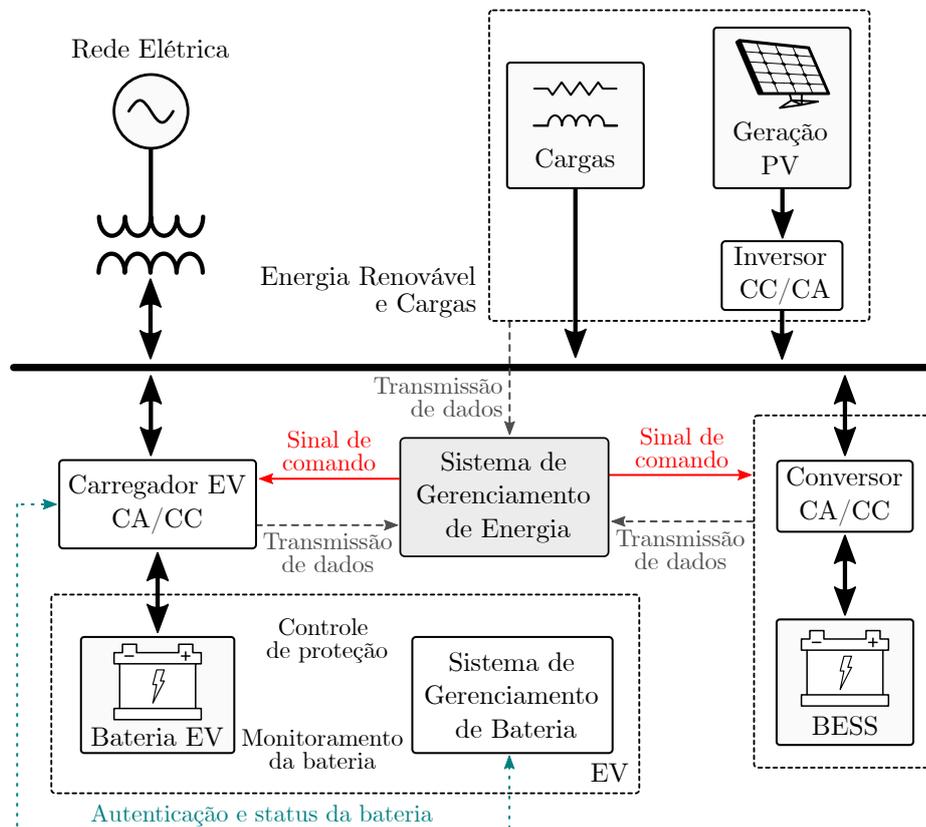
As microrredes podem ser definidas como subsistemas da rede elétrica e compostas por cargas locais, unidades de geração distribuída (GD) e, aumentando nos últimos anos, a integração de sistemas de armazenamento de energia, do inglês *energy storage system* (ESS), podendo essas operar conectadas ao sistema elétrico externo ou ilhadas do restante da rede (KUMAR *et al.*, 2017; BILBAO *et al.*, 2022). A utilização de sistemas de GD, juntamente com o aumento da instalação de ESS, possuem o intuito de suprir as demandas de fornecimento de energia e estão alterando significativamente o panorama energético (DAS *et al.*, 2020; WANG *et al.*, 2020; BILBAO *et al.*, 2022).

Geralmente as microrredes são interconectadas a redes de distribuição de baixa ou média tensão através de uma conexão direta ou fazendo o uso de um conversor de energia. Isso possibilita obter energia da rede elétrica e também fornecer energia à rede durante a geração de energia excedente por parte das fontes GD conectadas à microrrede (KUMAR *et al.*, 2017). Para as microrredes configuradas como redes inteligentes tem-se características que melhoram a segurança, a confiabilidade e a qualidade da rede, podendo operar no modo conectado à rede ou ilhado em casos de falhas. Através de equipamentos de medição, monitoramento, gerenciamento e acionamento dos elementos que compõem os sistemas de geração, distribuição e armazenamento de energia, as redes inteligentes possibilitam que tanto consumidores como concessionárias de energia sejam beneficiadas (SALVATTI, 2020; KUMAR *et al.*, 2017; DAS *et al.*, 2020).

As redes inteligentes incorporam cada vez mais recursos de energia distribuída e ESS, integrando microrredes e os elementos que as compõem à rede elétrica principal. O conceito de microrredes configuradas como redes inteligentes está sendo difundido cada vez mais, onde essas podem ser definidas como sistemas de energia em pequena escala que gerenciam as fontes de energia distribuída e as cargas conectadas à elas, obedecendo os limites elétricos definidos (HAJIAGHASI *et al.*, 2019; ZHOU *et al.*, 2020; SALVATTI, 2020). Além disso, outro ponto de destaque desses sistemas é o crescimento da geração descentralizada, a qual está situada próxima aos consumidores e está crescendo devido a fatores como diminuição nos custos de implantação, disponibilidade tecnológica e a própria flexibilização da legislação (SALVATTI, 2020).

Na Figura 1 é apresentada uma estrutura de uma microrrede CA composta por uma fonte de energia renovável, cargas, BESS e estação de carregamento EV. Além disso,

é ilustrado um sistema de gerenciamento de energia que recebe os dados dos elementos e envia os devidos sinais de comando. A estação de carregamento EV é ilustrada com fluxo de potência bidirecional, entretanto, vale destacar que o EV pode apenas carregar sua bateria caso assim escolher o proprietário do EV.



**Figura 1 – Estrutura de uma microrrede CA com estação de carregamento EV.**

Fonte: Adaptado de Wu *et al.* (2022).

O uso de EVs está se mostrando de grande valia para armazenar energia enquanto o veículo estiver ocioso em um posto de carregamento e, caso necessário e de interesse do proprietário, o EV pode fornecer energia à rede elétrica utilizando-se da tecnologia V2G (MWASILU *et al.*, 2014; SALVATTI, 2020; WU; LIN, 2021). Portanto, como os EVs possuem seu próprio sistema de armazenamento podem participar da operação de uma microrrede e aumentar a estocasticidade da energia gerada pelas fontes renováveis e, conseqüentemente, aumentar a confiabilidade da microrrede (KHOOBAN, 2018; ESEYE *et al.*, 2019).

Portanto, torna-se oportuno trabalhar com o conceito de redes inteligentes em microrredes com estações de carregamento de EVs, os quais podem ser um recurso importante como fonte de energia distribuída. Sendo assim, o desenvolvimento de um sistema

para gerenciar e controlar o fluxo de energia elétrica entre os elementos da microrrede é inevitável. Para tal propósito, estratégias para otimizar e monitorar o gerenciamento de sistemas de carregamento EV em uma microrrede são necessárias, objetivando melhorar a sua confiabilidade e qualidade de energia.

## 2.4 VEÍCULOS ELÉTRICOS

Veículos elétricos são denominados assim pois funcionam através de tração gerada por motores elétricos e geralmente utilizam energia proveniente de dispositivos de armazenamento de energia elétrica. Entre os dispositivos de armazenamento de energia elétrica mais comuns, as baterias se destacam pois possuem uma grande capacidade de armazenamento de energia comparadas aos demais (NASERI *et al.*, 2017).

Os EVs estão se tornando uma alternativa para substituir o uso de petróleo e assim reduzir os problemas de poluição causados pela combustão de combustíveis fósseis. Além disso, o uso desses veículos já está sendo levado em consideração no planejamento dos sistemas de distribuição de energia (PEREIRA *et al.*, 2018).

Conforme aumenta o número de fontes de energia renovável que são conectadas à rede elétrica ao longo do tempo, as pegadas ambientais dos veículos elétricos são reduzidas (EMADI, 2011). Esse é um fato que faz com que os veículos movidos a eletricidade vêm chamando atenção, pois possuem baixa emissão e uma redução eficiente na emissão de CO<sub>2</sub> (HANNAN *et al.*, 2017).

Como o foco desse trabalho são os veículos conectados à rede elétrica, os quais abrangem tanto os veículos elétricos híbridos *plug-in*, do inglês *plug-in hybrid electric vehicles* (PHEVs), quanto os veículos elétricos à bateria, do inglês *battery electric vehicles* (BEVs), então esses serão tratados apenas pelo termo EVs, entendendo-se que tal refere-se aos dois tipos de veículos elétricos citados. Um veículo elétrico *plug-in*, além de receber energia da rede elétrica para carregamento da bateria através de um carregador CA-CC, também pode fornecer energia a rede fazendo o uso de um conversor CC-CA na estação de recarga (EMADI, 2011; REDDY; NATARAJAN, 2018).

A bateria é um dos principais componentes dos EVs e precisa ser capaz de lidar com uma alta capacidade de energia e alta potência considerando peso e espaço limitados, além de um grande número de ciclos de vida e ampla faixa de temperatura. Há vários tipos de baterias disponível no mercado para utilizar em EVs e os principais tipos são as

baterias de chumbo-ácido, à base de níquel e à base de íons de lítio (KHALID *et al.*, 2021; ARETXABALETA *et al.*, 2021; ACHARIGE *et al.*, 2023). As baterias de chumbo-ácido são baratas, seguras e apresentam bom desempenho, entretanto, possuem baixa densidade de energia (30 - 40 Wh/kg) e vida útil curta (<1000 ciclos). Já as baterias à base de níquel apresentam um ciclo de vida mais longo (2000 ciclos), densidade de energia em torno de 120 Wh/kg e atendem EVs utilizados em condições extremas, pois funcionam bem em temperaturas muito baixas. No entanto, baterias à base de níquel apresentam alta taxa de auto-descarga, custo mais elevado e geração de calor em altas temperaturas. Destacam-se as baterias de íons de lítio devido a alta densidade de energia (180 Wh/kg), vida útil mais longa ( $\approx$  3000 ciclos) e baixa taxa de auto-descarga. As desvantagens das baterias íons de lítio consistem no alto custo e risco de incêndio devido a alta temperatura operacional (ARETXABALETA *et al.*, 2021; LIU *et al.*, 2022; ACHARIGE *et al.*, 2023). Portanto, as características do tipo de bateria a ser utilizada nos EVs são importantes em relação a autonomia, durabilidade e condições de operação e, além disso, a utilização do sistema de gerenciamento de bateria, do inglês *battery management system* (BMS), é crucial para garantir a operação confiável, eficiente e segura dos EVs.

Segundo a Agência Internacional de Energia, do inglês *International Energy Agency* (IEA), os carros elétricos tiveram um ano recorde em 2020, quando o estoque global de carros elétricos atingiu a marca de 10 milhões, o que representa um aumento de 43% em relação a 2019. Os BEVs representam dois terços dos novos registros de carros elétricos e dois terços do estoque de 2020 (IEA, 2021). Além disso, embora a maior parte do carregamento dos EVs seja feito em casa e no trabalho, a implementação de formas de carregamento acessível ao público será crítica, pois os países que lideram a implantação de EVs entrarão em um estágio em que uma autonomia maior será exigida pelos proprietários de EVs (IEA, 2021).

No Brasil, pelos EVs apresentarem grande potencial, já existem incentivos governamentais para preparar a transição dos veículos utilizados, com o foco de haver mais EVs do que veículos à combustão sendo comercializados daqui alguns anos. Para alcançar isso a longo prazo, criou-se a Lei 13.755, conhecida como Programa Rota 2030, em que uma das diversas diretrizes se refere à Mobilidade e Logística, a qual tem o intuito de tornar os EVs algo comum no Brasil e um dos objetivos é incentivar o setor automotivo a investir em projetos de pesquisa e desenvolvimento voltados ao mercado de EVs.

Sendo assim, com a crescente demanda de EVs, torna-se oportuno e relevante pesquisas e trabalhos sobre esses, uma vez que para carregá-los haverá uma alta demanda de energia e também poderão servir de suporte à microrrede na qual estão inseridas as estações de carregamento EV.

A eletrificação do transporte acabou alterando de maneira expressiva os modelos de negócios tradicionais das concessionárias de geração e distribuição de energia elétrica. Os EVs trouxeram consigo desafios e benefícios para a rede elétrica. A integração excessiva de EVs nas redes de distribuição impactam no perfil de carga, degradação da qualidade de energia, aumento na carga de pico e problemas de regulação de energia. Em contrapartida, esses problemas podem ser contornados utilizando técnicas de gerenciamento de energia e obtendo-se assim impactos positivos na integração dos EVs na rede (DAS *et al.*, 2020; SILVA, 2020; TAN *et al.*, 2016b; WANG *et al.*, 2020; GANDHI; WHITE, 2021). Como vantagens dessa inserção de EVs, são citadas as mais significativas:

- Usando carregamento ou descarregamento programado, um melhor gerenciamento de energia pode ser alcançado, onde a demanda de carga de pico pode ser atendida programando a descarga durante os horários de pico;
- Melhoria da qualidade de energia, uma vez que as oscilações de tensões podem ser atenuadas, potência reativa pode ser injetada quando necessário para regular o fator de potência (FP) e harmônicas injetadas pelas fontes de geração distribuída não controladas podem ser reduzidas;
- A regulação da frequência é importante para corrigir desvios na rede. Em situações de sobrecarga, a frequência da rede diminui, afetando a qualidade da energia. No conceito V2G, as baterias dos veículos elétricos podem ajudar a compensar essa sobrecarga, mantendo a frequência e a qualidade da energia estáveis;
- Equilíbrio do fluxo de energia, armazenando o excedente de geração;
- Suporte às fontes de energia renovável, tendo em visto que essas são intermitentes.

Com o crescimento do mercado de EVs, o número de estações de carregamento também aumentou, as quais podem ser classificadas em carregamento lento ou carregamento rápido (DAS *et al.*, 2020). Existem vários padrões estabelecidos no mundo, de diferentes órgãos reguladores, para a infraestrutura de carregamento de EVs. A Tabela 1 apresenta

os padrões mais utilizados, que são o IEC e SAE, onde é possível notar que esses possuem requisitos parecidos. O IEC é uma organização internacional de padronização que desenvolve padrões para tecnologias elétricas, eletrônicas e outras tecnologias relacionadas, enquanto o SAE é uma associação profissional com sede no Estados Unidos, que desenvolve padrões para órgãos de engenharia em diferentes setores (DAS *et al.*, 2020). Portanto, nota-se que o carregamento dos EVs pode usar fontes de alimentação de corrente alternada (CA) ou corrente contínua (CC), sendo que o carregamento CA pode ter diferentes níveis de tensão e frequência, o que é definido com base no sistema de distribuição de energia elétrica de cada país.

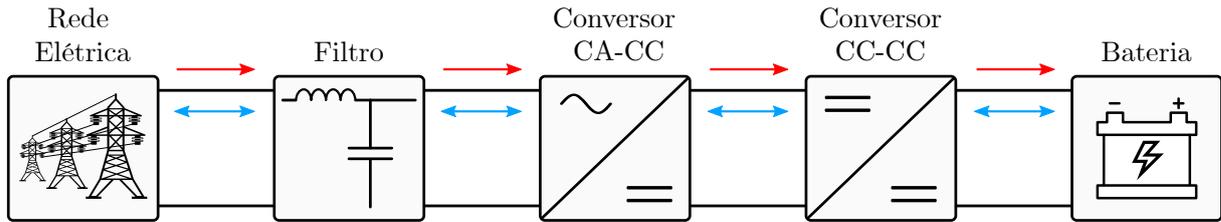
**Tabela 1 – Especificações técnicas dos padrões IEC 61851 e SAE J1772.**

Padrão	Modo/Nível	Conexão	Tensão de Entrada (V)	Corrente Máxima (A)	Potência Máxima (kW)
IEC 61851	Modo 1	1 $\phi$ ou 3 $\phi$ CA	250 - 480	16	4 - 13,3
	Modo 2	1 $\phi$ ou 3 $\phi$ CA	250 - 480	32	8 - 22
	Modo 3	1 $\phi$ ou 3 $\phi$ CA	250 - 480	32	8 - 22
	Modo 4	CC	1000	500	350
SAE J1772	Nível 1	1 $\phi$ CA	120	16	1,92
	Nível 2	1 $\phi$ CA	240	80	19,2
	Nível 3	3 $\phi$ CA ou CC	240 - 1000	80 - 500	19,2 - 350

**Fonte:** Adaptado de Rivera *et al.* (2021), Aretxabaleta *et al.* (2021) e Acharige *et al.* (2023).

O carregamento de EVs pode ser unidirecional ou bidirecional, no qual esse último tem o diferencial de poder operar no modo de carregamento ou descarregamento, permitindo que os EVs forneçam os vários serviços auxiliares à rede (TAN *et al.*, 2016b; DAS *et al.*, 2020). Diversos fabricantes de EVs já incorporaram carregadores bidirecionais em seus modelos, por exemplo, a Nissan com seu modelo Leaf e a Renault no Renault Zoe. Além disso, a Tesla e a BYD também já implementaram funções bidirecionais, assim como a Honda e a BMW (YUAN *et al.*, 2021). Uma configuração geral com os principais componentes envolvidos no carregamento de EVs é apresentada na Figura 2. Verifica-se a presença da bateria EV, etapas de conversão CC-CC e CA-CC, filtro e rede elétrica, e ainda, o fluxo unidirecional representado pelas setas vermelhas e o fluxo bidirecional de energia elétrica é indicado pelas setas azuis.

Outra questão relacionada ao carregamento EV e um desafio nesse âmbito se refere ao modo de carregamento CC, também conhecido pelos carregamentos semi-rápido e rápido, que traz consigo carregadores EV que exigem da rede uma grande demanda de potência. Um exemplo são os carregadores Terra 360 da empresa ABB que possuem



**Figura 2 – Configuração geral de carregador unidirecional e bidirecional.**

**Fonte: Adaptado de Das *et al.* (2020).**

potência nominal de até 360 kW, podendo carregar simultaneamente até dois EVs com distribuição dinâmica de potência (KANE, 2022). No Brasil, pode-se utilizar como exemplo os eletropostos da Copel, nos quais um possui em operação um carregador EV ultrarrápido com capacidade de 150 kW de potência e outro com dois equipamentos de recarga rápida com 60 kW de potência, contando com geração de energia solar na cobertura das vagas veiculares (AEN, 2022).

O objetivo principal da integração de EVs na rede é carregar suas baterias. Entretanto, no âmbito das redes inteligentes, os EVs possuem o propósito de suporte à rede e fornecer serviços ancilares como citados anteriormente. Sendo assim, para esses fins técnicas de gerenciamento para integração desses veículos à rede são implementadas utilizando diferentes estratégias e algoritmos no desenvolvimento. Portanto, o controle e gerenciamento efetivos de estações de carregamento EV é uma questão crucial para o crescimento e adoção dos veículos elétricos.

## 2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram abordadas as principais características e componentes envolvidos no carregamento de EVs através da conexão em estações de recarga presentes em microrredes com geração renovável. Inicialmente, foi apresentada a relação entre a geração de energia elétrica e o carregamento de EVs na rede elétrica. Logo após, descreveu-se os conceitos de redes inteligentes e microrredes, e como essas vêm alterando o sistema de energia elétrica. Por fim, foram apresentados os conceitos de EVs conectados à rede através de estações de carregamento e como esses podem afetar a rede elétrica, mas também fornecer suporte através de serviços ancilares.

### 3 SISTEMA DE GERENCIAMENTO PARA CARREGAMENTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS EM MICRORREDES COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

#### 3.1 INTRODUÇÃO

O capítulo 2 abordou conceitos e componentes envolvidos nos sistemas de carregamento de EVs em microrredes. Neste capítulo é apresentada a estrutura da microrrede com estacionamento de EVs considerada no trabalho, juntamente com a modelagem dos elementos que compõem essa microrrede. Sistemas de gerenciamento do carregamento de EVs baseados em lógica fuzzy também são avaliados e apresentados no capítulo. Além disso, é apresentado o sistema proposto de gerenciamento dos sistemas de carregamento dos EVs conectados à microrrede, descrevendo os modos de carregamento e as premissas adotadas para o gerenciador baseado em regras e utilizando um sistema de inferência fuzzy.

#### 3.2 ESTRUTURA DA MICRORREDE COM ESTACIONAMENTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

A estrutura da microrrede analisada neste trabalho é ilustrada na Figura 3 e inclui cargas de consumidores, arranjos de painéis fotovoltaicos e um sistema de armazenamento de energia em baterias, do inglês *battery energy storage system* (BESS), ligado a um barramento de energia CA. Estações de carregamento de EVs também estão incorporadas no sistema através de um barramento EV dedicado. Estas estações de carregamento têm duas etapas de conversão de energia, constituídas por conversores CC-CC e CC-CA, sendo unidirecionais ou bidirecionais dependendo do caso. Além disso, um transformador de potência liga os dois barramentos de potência à rede de distribuição elétrica.

##### 3.2.1 Modelagem dos Veículos Elétricos

O modelo linear da bateria de cada EV, utilizado por (KUMAR *et al.*, 2017) e (MONCECCHI *et al.*, 2021), representa o comportamento do estado de carga, do inglês *state of charge* (SOC), considerando a potência de carregamento entregue pela EVSE na

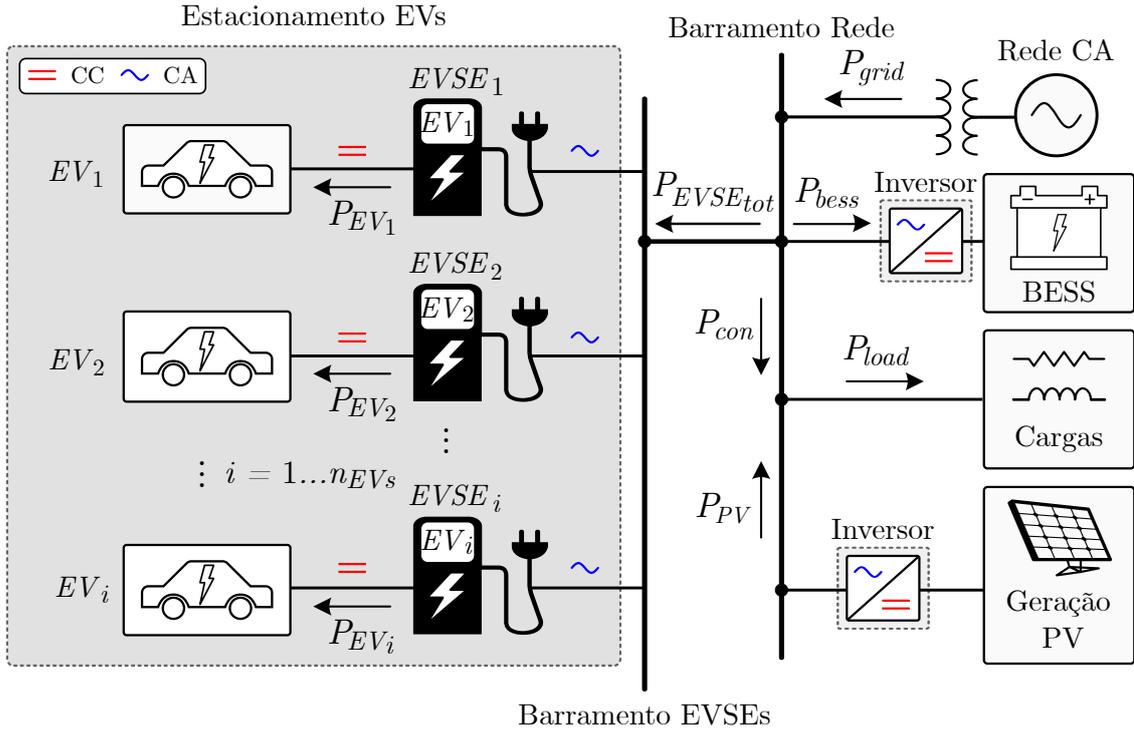


Figura 3 – Estrutura de microrrede com estacionamento de EVs, geração PV distribuída e cargas conectadas à rede elétrica externa.

qual o EV está conectado é dado por

$$SOC_{EV}[k] = SOC_{EV}[k-1] + \eta_{EVSE} \frac{P_{EVSE}[k]}{E_{bat}} \Delta t, \quad (1)$$

em que  $E_{bat}$  é a capacidade total da bateria em kWh do veículo elétrico,  $\eta_{EVSE}$  é a eficiência do conversor para carregamento ou descarregamento,  $P_{EVSE}$  é a potência de carregamento fornecida pela estação de carregamento e  $\Delta t$  indica o intervalo de tempo em horas.

O percentual de SOC da bateria do EV é calculado para a amostra  $k$ , considerada a medição atual, a partir da amostra armazenada anterior  $k-1$  e da potência disponível na recarga.

O SOC do EV é restrito para representar o comportamento característico e a potência de carregamento ( $P_{EVSE}$ ) na estação de carregamento é limitada, conforme indicado a seguir

$$20\% \leq SOC_{EV}[k] \leq 80\%. \quad (2)$$

Portanto, através da restrição apresentada na equação (2), a potência disponível na estação de carregamento do EV está condicionada a

$$P_{EVSE_i} = \begin{cases} P_{EV_i}, & \text{se } 20\% \leq SOC_{EV}[k] \leq 80\%, \\ 0, & \text{caso contrário,} \end{cases} \quad (3)$$

em que  $i$  é o ID da estação de carregamento. É importante destacar que esses níveis de potência são os considerados nesse trabalho, os quais foram definidos levando em consideração que na prática há BMS de EVs que fora desse intervalo de valores alteram a potência fornecida à estação de carregamento. Isso ocorre devido a mudança do modo de carregamento de corrente constante para tensão constante e podem reduzir a potência de carregamento aproveitando a capacidade plena da bateria.

### 3.2.2 Modelagem do Sistema de Armazenamento de Energia em Baterias

O BESS utiliza a mesma abordagem para a representação do comportamento da bateria do EV. No entanto, a operação dos dois elementos é diferente, uma vez que o BESS é uma bateria estacionária na microrrede, e os EVs são vistos como elementos de armazenamento dinâmicos devido ao fato de estarem conectados à microrrede apenas algumas vezes. Outro ponto a destacar é o fato da capacidade total do BESS ( $E_{bess}$ ) ser maior do que a capacidade de cada EV. Sendo assim, a seguinte equação linear é utilizada para representar o comportamento do banco de baterias:

$$SOC_{bess}[k] = SOC_{bess}[k-1] + \eta_{bess} \frac{P_{bess}[k]}{E_{bess}} \Delta t, \quad (4)$$

em que  $E_{bess}$  é a capacidade total do banco de baterias do sistema,  $\eta_{bess}$  é a eficiência do conversor para carga ou descarga, e  $P_{bess}$  é a potência de carga fornecida ao sistema de armazenamento de energia.

O SOC do BESS é restrito para representar o comportamento característico e para limitar a potência de carga  $P_{bess}$  e é, portanto, dado da seguinte forma

$$15\% \leq SOC_{bess}[k] \leq 85\%. \quad (5)$$

Portanto, a potência de carregamento do BESS é limitada às condições dadas por

$$P_{bess} = \begin{cases} P_{bess}, & \text{se } 15\% \leq SOC_{bess}[k] \leq 85\%, \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (6)$$

O perfil de potência de carregamento do BESS apresentado pela Equação 6 ilustra as condições consideradas nesse trabalho. Na prática o BMS de um BESS faz um controle mais robusto, considerando também a operação das baterias nos níveis extremos e modifica o valor de potência conforme o nível de SOC, modo de carregamento e outros parâmetros, aproveitando a plena capacidade das baterias.

### 3.2.3 Modelagem da Geração Fotovoltaica

A potência de geração do módulo fotovoltaico baseia-se na irradiância solar e na área do painel e é dada por

$$P_{PV_{max}}(p,t) = \eta_p \cdot A_{PV} \cdot I_{PV}(t), \quad (7)$$

em que  $\eta_p$  é a eficiência do módulo fotovoltaico,  $A_{PV}$  é a área de superfície ocupada pelo módulo em  $m^2$  e  $I_{PV}(t)$  é a irradiância solar incidente no módulo fotovoltaico em  $W/m^2$  no tempo  $t$  (SALVATTI *et al.*, 2020) e (HAMIDI *et al.*, 2018), sendo o período de amostragem equivalente a um minuto neste trabalho.

Dado que os módulos fotovoltaicos estão distribuídos em arranjos ligados à microrrede, a potência destes arranjos é dada por

$$P_{PV}(t) = \eta_{PV} \sum_{p=1}^{N_{PV}} P_{PV}(p,t), \quad (8)$$

sendo  $\eta_{PV}$  a eficiência dos conversores no arranjo,  $p$  o módulo PV e  $N_{PV}$  o número máximo de módulos fotovoltaicos instalados.

### 3.2.4 Modelagem da Rede Elétrica

A potência resultante entre a demanda e a geração da microrrede é dada por

$$P_{con}(t) = P_{load}(t) - P_{PV}(t), \quad (9)$$

como ilustrado na Figura 3. As potências  $P_{PV}(t)$  e  $P_{load}(t)$  são consideradas, respectivamente, a geração de energia fotovoltaica e a demanda de energia da carga local no tempo  $t$ . Uma condição importante na avaliação da microrrede é  $P_{con}(t) > 0$  se a geração for inferior à demanda e  $P_{con}(t) < 0$  se a geração for superior à demanda. Estas condições permitem definir as operações de carregamento dos EVs e do BESS.

A potência ativa resultante na rede elétrica é representada pela variável  $P_{grid}$ , resultante da soma dos fluxos de potência dos elementos PV, das estações de carregamento de EVs e das cargas conectadas ao barramento CA da microrrede, e é dada por

$$P_{grid}(t) = P_{EVSE_{tot}}(t) + P_{con}(t) + P_{bess}(t), \quad (10)$$

em que  $t$  é a variável de amostra para todo o período de análise, dado por  $[1, N]$ , em que  $N$  é o número máximo de amostras, considerando que cada amostra representa 1 minuto e o período total de análise é de um dia (24 horas), ou seja, 1440 amostras.

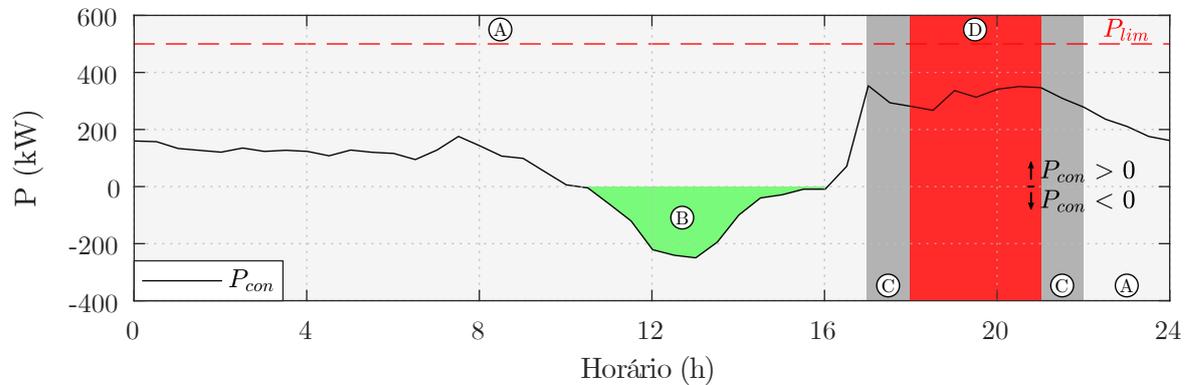
Uma das características de uma microrrede ligada à rede é a capacidade de comprar energia em condições em que a geração é inadequada e vender energia de volta à rede em momentos de excedente de geração PV. As condições que podem descrever a energia importada e exportada em determinado momento são  $P_{grid}(t) > 0$  no caso da compra de energia e  $P_{grid}(t) < 0$  no caso da venda de energia.

### 3.3 GERENCIAMENTO DAS ESTAÇÕES DE CARREGAMENTO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS

A abordagem de gerenciamento proposta permite que o usuário do EV escolha o modo de carregamento que satisfaça os requisitos de tempo e custo no momento da conexão do veículo na estação de carregamento. Os modos operam com base nas regiões A, B, C e D, ilustradas na Figura 4 e descritas a seguir:

- **Região A:** Não há excedente de geração PV ( $P_{con} > 0$ ), característica que ocorre porque  $P_{PV} < P_{load}$ . A tarifa de energia nesta região de operação do gerenciador é a tarifa fora de ponta, que tem o menor custo de energia (R\$/kWh).
- **Região B:** Caracterizada principalmente pelo excedente de geração PV ( $P_{con} < 0$ ), uma condição favorável devido a  $P_{PV} > P_{load}$ . A tarifa de energia para esta região também é considerada fora de ponta e está contida na Região A. Esta região tem as melhores condições para gerar o maior lucro para o proprietário do estacionamento, tornando possível vender o excedente de energia para a rede e carregar os EVs conectados. Além disso, com um banco de baterias conectado na microrrede é possível carregá-lo durante o excedente PV e vender a energia na Região C, e especialmente na Região D.
- **Região C:** Sem excedente de geração PV, esta região foi definida entre as tarifas de energia de menor e maior custo. Portanto, a tarifa aplicada é a intermediária.
- **Região D:** Caracterizada principalmente pelo maior custo de energia, abrangendo um cenário sem excedente de geração PV ( $P_{con} > 0$ ) e adotando o preço da tarifa de ponta. Essa região é favorável para o lucro na venda de energia dos EVs conectados no modo V2G. Além disso, com a venda de energia no modo V2G, é possível evitar

que a potência da microrrede ultrapasse o limite de potência contratada, o que resultaria em uma multa por ultrapassagem da demanda de energia contratada.



**Figura 4 – Regiões de operação do gerenciador.**

A estratégia de carregamento dos EVs proposta foi desenvolvida com base no sistema apresentado em (SALVATTI *et al.*, 2020). A estrutura do sistema de gerenciamento de energia proposta nesse trabalho e aplicada aos modos de carregamento é baseada em regras e observada no carregamento de EVs. É utilizada uma ordem de prioridade para gerenciar o carregamento. Portanto, quando a demanda da microrrede é comprometida pelo seu limite de potência contratada, o carregamento é mantido para os modos de maior prioridade, seguindo a ordem: ULTRA → FAST → ECO → V2G e limitada para os modos restantes.

A Figura 5 ilustra a estrutura simplificada da microrrede, em que os EVs são agrupados por modos de carregamento. Os índices  $u$ ,  $f$ ,  $e$  e  $v$  identificam, respectivamente, os modos ULTRA, FAST, ECO e V2G. Além disso, também são indicados os elementos gerenciados e não gerenciados do sistema proposto.

### 3.3.1 Modo ULTRA

O modo ULTRA representa o carregamento ultrarrápido de veículos elétricos e dá alta prioridade aos usuários, fornecendo carregamento na potência nominal do carregador. Quando a limitação é necessária, depende apenas da medição atual de  $P_{con}$ .

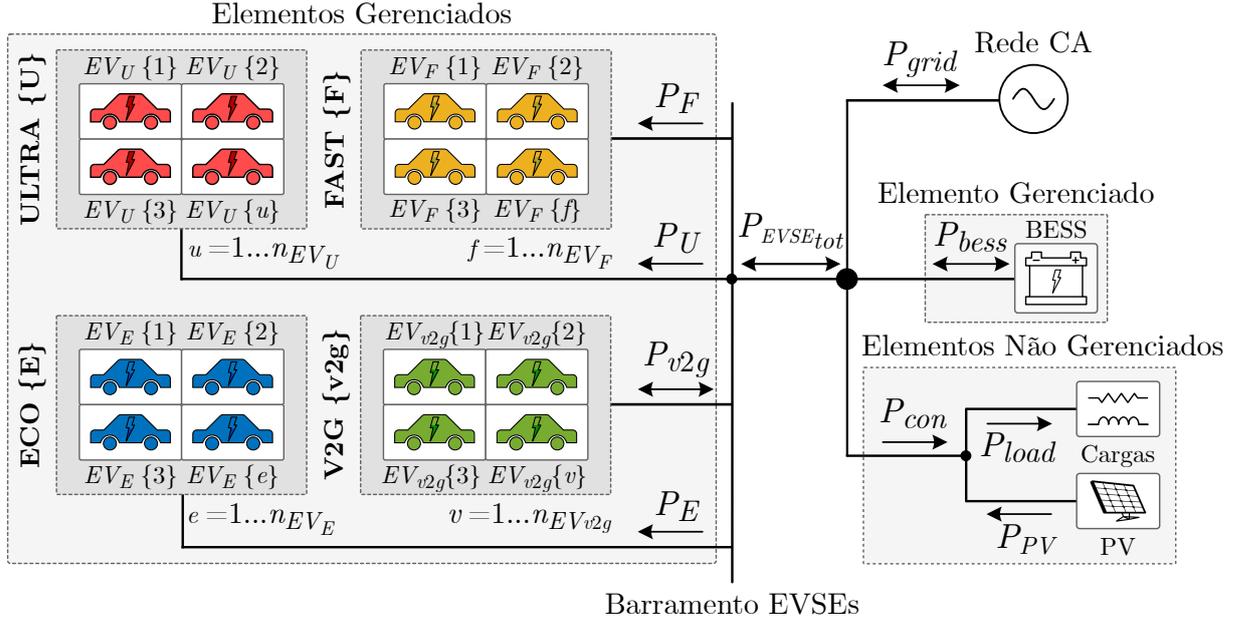


Figura 5 – Estrutura simplificada da microrrede, agrupando os EVs por modo de carregamento e indicando os elementos gerenciados e não gerenciados.

Premissas são adotadas para a operação de carregamento EV no modo ULTRA:

- Carregamento ultrarrápido de EVs, caracterizado por carregadores que funcionam em modo DC;
- Fornece a potência nominal do carregador, até 150 kW;
- Carregamento em tempo reduzido e com maior prioridade, então os custos de energia são mais elevados devido aos privilégios.

Se for necessário aplicar limitações à potência de carregamento do EV nesse modo, o índice é determinado por

$$K_{lim, EV_U}(t) = \frac{P_{lim} - P_{con}(t)}{\sum P_{nom, EV_U}(t)}, \quad (11)$$

em que  $P_{lim}$  é a demanda de potência contratada pela microrrede na qual as estações de carregamento estão ligadas e  $P_{nom, EV_U}$  é a potência nominal de carregamento de cada EV no modo ULTRA. Portanto, o perfil de carregamento do modo ULTRA é dado por

$$P_{EV_U} = \begin{cases} P_{nom, EV_U}, & \text{se } P_{con}(t) + P_U(t) \leq P_{lim} \\ P_{lim, EV_U}(t), & \text{caso contrário,} \end{cases} \quad (12)$$

em que  $P_{lim, EV_U}(t) = K_{lim, EV_U}(t) \cdot P_{nom, EV_U}$ .

A soma das potências dos EVs conectados no modo ULTRA é

$$P_U = \sum_{u=1}^{n_{EV_U}} P_{EV_U\{u\}}, \quad (13)$$

sendo  $n_{EV_U}$  o número total de EVs conectados no modo ULTRA.

### 3.3.2 Modo FAST

O modo FAST proporciona um carregamento rápido ao EV, com uma prioridade inferior em relação ao modo ULTRA. No caso de limitação de potência, a limitação é aplicada primeiro ao modo FAST devido ao modo ULTRA possuir custo de carregamento maior que os demais modos. Esse modo depende da medição atual das variáveis  $P_{con}$  e  $P_U$ .

As premissas adotadas para o modo FAST são:

- Carregamento rápido de EVs;
- Fornece a potência nominal de 50 kW, quando possível, com o carregador operando em modo DC;
- Alta prioridade para o fornecimento da demanda de potência, entretanto menor que a do modo ULTRA;
- Se a limitação da microrrede for atingida no modo ULTRA, os EVs no modo FAST não carregarão até que a condição de limitação deixe de ocorrer.

Se houver uma demanda de potência na microrrede acima do valor contratado, esse modo sofrerá uma limitação de carregamento através do índice

$$K_{lim,EV_F}(t) = \frac{P_{lim} - P_{con}(t) - P_U(t)}{\sum P_{nom,EV_F}(t)}, \quad (14)$$

sendo  $P_{nom,EV_F}$  a potência nominal de carregamento de cada EV conectado no modo FAST. Desta forma, o perfil de potência de carregamento para EVs em modo FAST é descrito por

$$P_{EV_F} = \begin{cases} P_{nom,EV_F}, & \text{se } P_{con}(t) + P_U(t) + P_F(t) \leq P_{lim} \\ P_{lim,EV_F}(t), & \text{caso contrário,} \end{cases} \quad (15)$$

em que  $P_{lim,EV_F}(t) = K_{lim,EV_F}(t) \cdot P_{nom,EV_F}$ .

A soma das potências dos EVs conectados e carregando em modo FAST é dada por

$$P_F = \sum_{f=1}^{n_{EV_F}} P_{EV_F\{f\}}, \quad (16)$$

sendo  $n_{EV_F}$  o número total de EVs conectados no modo FAST.

### 3.3.3 Modo ECO

O modo ECO possui baixa prioridade e não garante o carregamento total do EV, uma vez que utiliza o excedente de geração PV disponível na microrrede. Se a potência da microrrede atingir a demanda contratada, então este modo terá a potência limitada antes dos modos ULTRA e FAST. O modo ECO depende da medição atual da potência resultante entre a demanda e a geração descrita pela variável  $P_{con}$ , das demandas dos modos ULTRA ( $P_U$ ) e FAST ( $P_F$ ) e do custo de energia ( $r_G$ ).

No modo ECO, são aplicadas mais premissas em comparação com os modos ULTRA e FAST, as quais são:

- Carregamento econômico dos EVs, proporcionando custos de energia mais baixos para o carregamento dos EVs conectados neste modo;
- Visa carregar o EV preferencialmente durante os períodos em que há excedente de geração PV, fornecendo ao usuário uma maneira econômica de carregar durante os períodos de menor demanda;
- Os custos de carregamento são reduzidos em comparação com os modos ULTRA e FAST pois o modo ECO usa preferencialmente o excedente PV e a energia não é comprada da rede elétrica externa. Se for necessário comprar energia da rede elétrica, será escolhida a janela de tempo com a menor tarifa e demanda;
- A potência de carregamento pode atingir metade da potência nominal do carregador, o que só ocorrerá com um alto nível excedente de energia na microrrede;
- A prioridade de carregamento é inferior aos modos ULTRA e FAST, implicando também em um custo menor;
- O modo ECO não objetiva alcançar o SOC final desejado do EV;

- Em caso da potência da microrrede alcançar a demanda contratada já nos modos de recarga de maior prioridade, a potência de carregamento ECO é nula.

Resumidamente, nesse modo o proprietário do estacionamento não quer comprar energia da rede elétrica e o proprietário EV tem interesse em carregar com custo reduzido. Portanto, para satisfazer ambos é preciso vender e carregar no excedente de geração PV. O ECO pode carregar com metade da potência máxima, desde que haja geração PV excedente ( $P_{con} < 0$ ) e não tenha EVs de maior prioridade requerendo potência de carregamento de forma a resultar na condição  $P_{grid} \geq 0$ . Portanto, o objetivo do ECO é minimizar a quantidade de energia proveniente da rede elétrica externa, visando o menor custo de carregamento para o usuário do EV.

Para esse modo, a energia fornecida aos EVs é iniciada se a condição  $P_{con} < 0$  for atingida, priorizando o uso do excedente de geração PV. A potência de carregamento dos EVs no modo ECO é dada por

$$P_{calc, EV_E\{e\}} = \begin{cases} |P_{con}|, & \text{se } |P_{con}| \leq 0,5 \cdot P_{max, EV_E\{e\}} \\ 0,5 \cdot P_{max, EV_E\{e\}}, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (17)$$

Além disso, é avaliado se ocorrer a condição  $P_{con} + P_{EVSE_{tot}} + P_{calc, EV_E\{e\}} \geq 0$ , considerando a potência medida do  $EV_E\{e\}$ . Caso essa condição seja verdadeira, a potência de carregamento do  $EV_E\{e\}$  é definida por

$$P_{calc, EV_E\{e\}} = |P_{con} + P_{EVSE_{tot}}|, \quad (18)$$

sendo  $EV_E\{e\}$  a identificação do EV conectado no modo ECO. A aplicação dessas condições resulta no carregamento do EV aproveitando o excedente de geração PV e sem custos adicionais de compra de energia da rede para o modo ECO.

Se for necessário aplicar limitações à potência de carregamento do EV nesse modo, o índice é determinado por

$$K_{lim, EV_E}(t) = \frac{P_{lim} - P_{con}(t) - P_U(t) - P_F(t)}{\sum P_{calc, EV_E}(t)}, \quad (19)$$

em que  $P_{calc, EV_E}$  é a potência de carregamento calculada de cada EV conectado a esse modo. Portanto, é possível descrever o perfil de potência de carregamento do modo ECO como

$$P_{EV_E} = \begin{cases} P_{calc, EV_E}, & \text{se } P_{cond_E} \leq P_{lim} \\ P_{lim, EV_E}(t), & \text{caso contrário,} \end{cases} \quad (20)$$

em que  $P_{lim,EV_E}(t) = K_{lim,EV_E}(t) \cdot P_{calc,EV_E}$ , e a variável de condição  $P_{cond_E}$  é dada por

$$P_{cond_E} = P_{con}(t) + P_U(t) + P_F(t) + P_E(t). \quad (21)$$

A soma das potências dos EVs no modo ECO é dada por

$$P_E = \sum_{e=1}^{n_{EV_E}} P_{calc,EV_E\{e\}}, \quad (22)$$

sendo  $n_{EV_E}$  o número total de EVs conectados nesse modo.

### 3.3.4 Modo V2G

O modo V2G é um carregamento inteligente e bidirecional que permite carregar e descarregar EVs, proporcionando lucro ao usuário e, ao mesmo tempo, oferecendo suporte à microrrede, o que o torna mais complexo do que os outros modos. O modo V2G possui mais premissas para satisfazer as preferências do proprietário do estacionamento e do usuário EV.

As premissas que determinam a operação de carregamento do modo V2G são:

- Visa o carregamento preferencialmente em períodos de excedente de geração PV, buscando economia para o usuário do EV e carregando quando há uma baixa demanda;
- Permite o carregamento de EVs a um menor custo, por aproveitar o excedente de geração PV disponível na microrrede;
- Se não ocorrer um excedente de geração PV, esse modo buscará o carregamento nos momentos em que a tarifa de energia for mais baixa e sem comprometer a demanda da microrrede;
- Alta flexibilidade e, conseqüentemente, alta complexidade devido ao número de variáveis levadas em consideração.

A potência de carregamento para EVs conectados no modo V2G é calculada a partir da condição  $P_{con} < 0$ , priorizando o excedente de geração PV. Inicialmente, a potência de carregamento nesse modo é dada por

$$P_{calc,EV_{v2g}\{v\}} = \begin{cases} |P_{con}|, & \text{se } |P_{con}| \leq 0,5 \cdot P_{max,EV_{v2g}\{v\}} \\ 0,5 \cdot P_{max,EV_{v2g}\{v\}}, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (23)$$

A condição a ser avaliada em seguida é o fluxo de potência da rede  $P_{grid}$ , considerando o valor de  $P_{calc, EV_{v2g}\{v\}}$  calculado na amostra analisada, o qual se permanecer negativo, indica que ainda há excedente de geração PV remanescente. Entretanto, se a condição  $P_{con} + P_{EVSE_{tot}} + P_{calc, EV_{v2g}\{v\}} \geq 0$  for verdadeira, a potência de carregamento do  $EV_{v2g}\{v\}$  é definida por

$$P_{calc, EV_{v2g}\{v\}} = |P_{con} + P_{EVSE_{tot}}|, \quad (24)$$

sendo  $EV_{v2g}\{v\}$  é a identificação do EV avaliado e conectado no modo V2G, em que o identificador  $v$  varia até o número de EVs conectados nesse modo.

Se for necessário aplicar a limitação de potência na potência de carregamento do EV no modo V2G, o índice é determinado por

$$K_{lim, EV_{v2g}}(t) = \frac{P_{lim} - P_{con}(t) - P_U(t) - P_F(t) - P_E(t)}{\sum P_{calc, EV_{v2g}}(t)}, \quad (25)$$

em que  $P_{calc, EV_{v2g}}$  é a potência de carregamento calculada para cada EV conectado a esse modo.

Portanto, é possível descrever o perfil de potência de carregamento ( $P_{EV_{v2g}}^+$ ) do modo V2G como

$$P_{EV_{v2g}}^+ = \begin{cases} P_{calc, EV_{v2g}}, & \text{se } P_{cond_{v2g}} \leq P_{lim} \\ P_{lim, EV_{v2g}}(t), & \text{caso contrário,} \end{cases} \quad (26)$$

em que  $P_{lim, EV_{v2g}}(t) = K_{lim, EV_{v2g}}(t) \cdot P_{calc, EV_{v2g}}$ , e a variável de condição  $P_{cond_{v2g}}$  é dada por

$$P_{cond_{v2g}} = P_{con}(t) + P_U(t) + P_F(t) + P_E(t) + P_{v2g}^+(t). \quad (27)$$

A soma das potências dos EVs conectados no modo V2G durante a operação de carregamento é dada por

$$P_{v2g}^+ = \sum_{v=1}^{n_{EV_{v2g}}} P_{calc, EV_{v2g}\{v\}}, \quad (28)$$

sendo  $n_{EV_{v2g}}$  o número total de EVs conectados nesse modo.

Para a operação de descarregamento no modo V2G, onde os EVs em V2G operam oferecendo suporte à microrrede e fornecendo serviço ancilar, as premissas adotadas são:

- Descarregar a bateria com lucro para o usuário do EV e, ao mesmo tempo, fornecer suporte à microrrede;

- No gerenciador baseado em regras o modo V2G opera no fornecimento de energia para a microrrede nos momentos em que a demanda contratada de energia é atingida, evitando multas por ultrapassagem de potência. Por outro lado, no gerenciador utilizando lógica fuzzy o modo V2G vai operar vendendo energia nos períodos de tarifas mais elevadas;
- No caso da limitação da demanda contratada da microrrede devido ao carregamento de EVs, o V2G visa descarregar os EVs nesse modo para atender ao carregamento dos outros modos. Portanto, os EVs no V2G podem aumentar o valor virtual da demanda contratada da microrrede;
- O SOC da bateria dos EVs no modo V2G durante a operação de descarga precisa ser superior a 40%, garantindo uma autonomia mínima para o EV dirigir após se desconectar da estação de recarga;
- Esse modo não coloca a bateria em um estado de carga baixo o suficiente para reduzir a sua vida útil, operando na faixa de SOC de 40% a 80%;
- Pode fornecer uma potência nominal de 50 kW na estação de recarga durante a operação de descarga do EV.

A potência de descarregamento ( $P_{v2g,tot}^-$ ) no modo V2G para abastecer EVs nos modos ULTRA e FAST é calculada por

$$P_{v2g,tot}^- = P_{grid} - P_{lim}, \quad (29)$$

e, a potência de descarregamento ( $P_{v2g,EV}^-$ ) de cada EV nesse modo é dada por

$$P_{v2g,EV}^- = \frac{P_{v2g,tot}^-}{num_{EV_{v2g}}} \quad (30)$$

em que  $num_{EV_{v2g}}$  é o número total de EVs V2G que fornecem energia em determinado período.

No caso dos EVs no modo V2G não possuem a capacidade de fornecer toda a potência exigida pelos modos ULTRA e FAST, uma limitação de potência é aplicada à ambos os modos. As limitações para os modos ULTRA e FAST, respectivamente, considerando o modo V2G fornecendo energia para o carregamento desses, são expressas por

$$K_{lim,EV_U}(t) = \frac{P_{lim} + |P_{v2g}^-(t)| - P_{con}(t)}{\sum P_{nom,EV_U}(t)}, \quad (31)$$

e

$$K_{lim, EV_F}(t) = \frac{P_{lim} + |P_{v2g}^-(t)| - P_{con}(t) - P_U(t)}{\sum P_{nom, EV_F}(t)}, \quad (32)$$

em que  $P_{v2g}^-(t)$  é a potência fornecida pelos EVs conectados no modo V2G.

### 3.3.5 Operação do Sistema de Armazenamento de Energia de Baterias

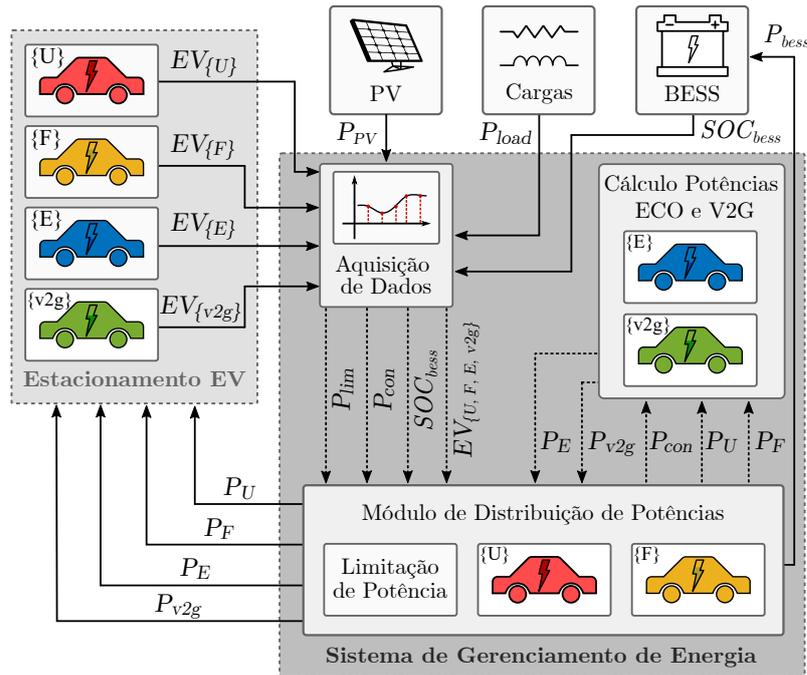
A operação do BESS nesse trabalho está vinculada às condições da microrrede, ao preço da energia e ao excedente de geração, assim como aos modos de carregamento de EVs. Portanto, as premissas adotadas para sua operação são:

- Prioridade de carregamento menor do que os modos de carregamento de EV;
- Carregamento quando há excedente de energia PV ou quando o custo da energia da rede é baixo;
- Potência de carregamento nominal definida para 100 kW;
- Fornece potência quando a demanda de potência contratada da microrrede é atingida, e a limitação da potência de carregamento de EVs ocorre se nenhum EV em V2G é capaz de fornecer a potência necessária.

A presença do BESS permite maior flexibilidade à microrrede, armazenando a energia da fonte PV que seria injetada na rede e reutilizando essa energia no carregamento de EVs. Portanto, o BESS é usado para mitigar as flutuações e a imprevisibilidade que as fontes de energia renováveis podem introduzir.

## 3.4 SISTEMA DE GERENCIAMENTO BASEADO EM REGRAS

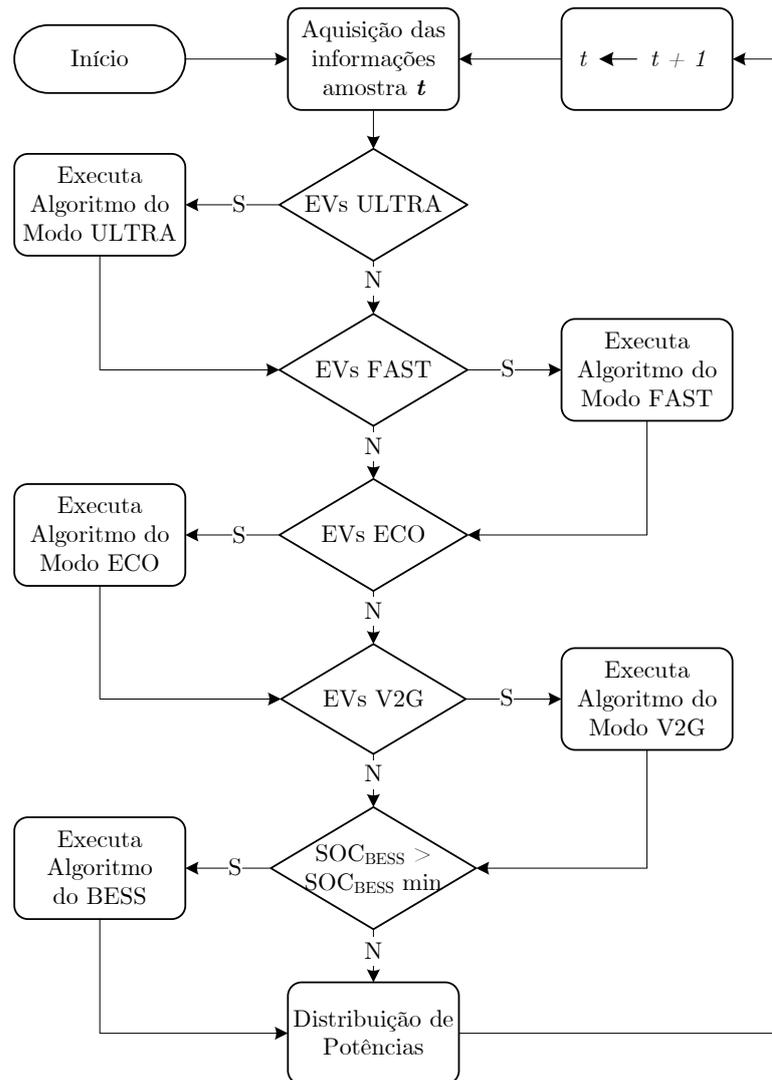
O Sistema de Gerenciamento de Estações de Carregamento de Veículos Elétricos (EV-CSMS) na microrrede com geração distribuída foi projetado para operar de forma centralizada e, para fins de simplificação, é chamado de EMS neste trabalho. Os dados recebidos são processados e os comandos para cada elemento de gerenciamento são gerados. O objetivo é identificar os modos de carregamento definidos pelos usuários de EVs e agrupá-los de modo que, após o processamento de dados pelo gerenciador, as potências de carregamento sejam distribuídas entre os EVs de cada modo, conforme apresentado na Figura 6.



**Figura 6 – Arquitetura do sistema de gerenciamento.**

O EMS consiste em diferentes módulos, incluindo aquisição de dados, cálculo de potência, limitação de potência e distribuição de potência. O sistema de aquisição de dados reúne informações como geração PV, demanda de carga e informações dos EVs conectados. Em seguida, o gerenciador determina os valores de potência necessários para carregar os EVs em diferentes modos, gerenciando as condições de potência dos EVs nos modos ECO e V2G, e a operação do BESS. Por fim, os dados de saída são as potências de carregamento dos EVs conectados às estações de carregamento.

O gerenciador opera por meio de algoritmos que consideram as premissas predefinidas para cada modo de carregamento de EVs. A ordem de prioridade dos modos de carregamento deve ser seguida, pois cada modo considera a demanda criada por seu antecessor durante o mesmo período de tempo  $t$ . A operação do sistema de gerenciamento das potências de operação dos modos de carregamento EV e do BESS segue o fluxograma apresentado pela Figura 7. Para cada amostra  $t$  é feita a aquisição das informações da microrrede, como geração PV, demanda de cargas e EVs, e a partir disso é verificada a presença de EVs em cada modo e executado o algoritmo responsável por calcular as potências referentes ao modo específico. Após todos os modos serem conferidos e devidamente tratados pelo gerenciador, são verificadas as condições de SOC do BESS. A partir das potências de carregamento, ou descarregamento se for o caso, para os EVs e BESS calculadas, essas são distribuídas entre os respectivos elementos e o processo se repete para a próxima amostra.



**Figura 7 – Fluxograma de operação do sistema de gerenciamento das potências de operação dos modos de carregamento EV e do BESS.**

O Algoritmo 1 é responsável por verificar a necessidade de limitar a potência de carregamento de um ou mais modos de carregamento dos EVs. O algoritmo de limitação de potência é solicitado pelos algoritmos dos modos de carregamento, que são apresentados a seguir nesse trabalho. Inicialmente, é verificado o modo de carregamento que solicitou a verificação de limitação de potência. Em seguida, as condições de limitação são executadas no caso de exceder a demanda de energia contratada, o que é verdadeiro quando  $P_{grid_{est}} \geq P_{lim}$ . Antes de calcular o índice de limitação para os modos ULTRA e FAST, é avaliada a disponibilidade de fornecimento de potência por EVs no modo V2G e pelo BESS. Além disso, quando solicitado pelo modo V2G, o algoritmo avalia a quantidade de potência que esse modo pode fornecer no instante de análise e, caso seja necessário limitar a potência alocada aos modos ULTRA e FAST, os índices de limitação são calculados considerando a

quantidade de potência V2G disponibilizada.

---

**Algoritmo 1 – Verificação da Limitação de Potência.**

---

```

1: Verificação do Modo de Carregamento EV:
2: se  $mode == ULTRA$  então
3:    $P_{grid_{est}} \leftarrow P_{con} + P_{U_{est}};$ 
4: finaliza se
5: se  $mode == FAST$  então
6:    $P_{grid_{est}} \leftarrow P_{con} + P_{U_{est}} + P_{F_{est}};$ 
7: finaliza se
8: se  $mode == ECO$  então
9:    $P_{grid_{est}} \leftarrow P_{con} + P_{U_{est}} + P_{F_{est}} + P_{E_{est}};$ 
10: finaliza se
11: se  $mode == V2G$  então
12:    $P_{grid_{est}} \leftarrow P_{con} + P_{U_{est}} + P_{F_{est}} + P_{E_{est}} + P_{v2g_{est}};$ 
13: finaliza se
14: Verificação da Limitação de Potência no Modo EV Identificado por  $mode$ :
15: se  $P_{grid_{est}} \geq P_{lim}$  então
16:   se  $(n_{EV_{v2g}} > 0) \vee (SOC_{bess} > 15\%)$  então
17:     se  $(mode == ULTRA) \vee (mode == FAST)$  então
18:       se  $n_{EV_{v2g}} > 0$  então
19:         Calcular  $P_{v2g,tot}^- \leftarrow (P_{grid_{est}} - P_{lim});$ 
20:         Calcular  $P_{v2g,EV}^- \leftarrow P_{v2g,tot}^- / num_{EV_{v2g}};$ 
21:       senão,
22:         se  $SOC_{bess} > 15\%$  então
23:            $P_{bess}^- \leftarrow P_{grid_{est}} - P_{lim};$ 
24:         finaliza se
25:       finaliza se
26:     finaliza se
27:   senão,
28:     Calcular  $K_{lim,EV_{mode}}$  utilizando uma das eq. (11, 14, 19 ou 25) conforme o modo EV;
29:   Reavaliação da Potência de Carregamento:
30:   para  $i = 1 : num_{EV_{mode}}$  faça
31:      $P_{lim,EV_{mode}\{i\}} \leftarrow K_{lim,EV_{mode}} \cdot P_{nom,EV_{mode}\{i\}};$ 
32:     Recalcular  $P_{est,EV_{mode}\{i\}} \leftarrow P_{lim,EV_{mode}\{i\}};$ 
33:     Recalcular  $SOC_{est,EV_{mode}\{i\}}$  usando eq. (1);
34:     Calcular  $P_{mode_{lim}} \leftarrow \sum_{i=1}^{n_{EV_{mode}}} P_{est,EV_{mode}\{i\}};$ 
35:   finaliza para
36:   Recalcular  $P_{mode_{est}} \leftarrow P_{mode_{est}} - P_{mode_{lim}};$ 
37: finaliza se
38: finaliza se
39: Verificação da Limitação de Potência em ULTRA e FAST pelo Modo V2G:
40: se  $n_{EV_{v2g}} > 0$  então
41:   se  $n_{EV_U} > 0$  então
42:     se  $P_{con} + P_{U_{est}} - |P_{v2g_{est}}| \geq P_{lim}$  então
43:       Calcular  $K_{lim,EV_U}$  usando eq. (31);
44:        $K_{lim,EV_F} \leftarrow 0;$ 
45:     finaliza se
46:   finaliza se
47:   se  $n_{EV_F} > 0$  então
48:     se  $P_{con} + P_{U_{est}} + P_{F_{est}} - |P_{v2g_{est}}| \geq P_{lim}$  então
49:       Calcular  $K_{lim,EV_F}$  usando eq. (32);
50:     finaliza se
51:   finaliza se
52: finaliza se

```

---

A operação do modo ULTRA é descrita pelo Algoritmo 2. O algoritmo desse modo é baseado em três etapas principais: estimativa da potência de carregamento, verificação da limitação de potência e distribuição da potência de carregamento. Na primeira etapa, a potência estimada e o SOC do  $EV_{U\{i\}}$  são calculados, onde  $i$  varia de 1 até o número total de EVs no modo ULTRA. A potência total destinada ao modo ULTRA também é estimada. Posteriormente, é verificado se a demanda de potência contratada para a microrrede é excedida, o que é feito usando o Algoritmo 1. Na etapa de verificação da limitação de potência, antes de aplicar a restrição é verificado se há EVs no modo V2G e as condições de operação do BESS para fornecer potência. Por fim, a última etapa refere-se à distribuição da potência de carregamento conforme a potência calculada nas etapas anteriores.

---

**Algoritmo 2 – Modo ULTRA.**

---

```

1: se  $n_{EV_U} > 0$  então
2:   Etapa 1 - Estimação da Potência de Carregamento:
3:   para  $u = 1 : num_{EV_U}$  faça
4:     Calcular  $P_{est, EV_U\{u\}} \leftarrow P_{nom, EV_U\{u\}}$ ;
5:     Calcular  $SOC_{est, EV_U\{u\}}$  usando eq. (1);
6:     Calcular  $P_{U_{est}} \leftarrow \sum_{u=1}^{n_{EV_U}} P_{est, EV_U\{u\}}$ ;
7:     Calcular  $P_{grid_{est}} \leftarrow P_{con} + P_{U_{est}}$ ;
8:   finaliza para
9:   Etapa 2 - Verificação da Limitação de Potência no Modo ULTRA:
10:   $mode \leftarrow ULTRA$ ;
11:  Executar o Algoritmo 1;
12: finaliza se
13: Etapa 3 - Distribuição da Potência de Carregamento:
14: se  $mode == ULTRA$  então
15:  para  $u = 1 : num_{EV_U}$  faça
16:    se  $P_{con} + P_U < P_{lim}$  então
17:       $P_{EV_{SEU}\{u\}} \leftarrow P_{nom, EV_U\{u\}}$ ;
18:      Calcular  $SOC_{k, EV_U\{u\}}$  usando eq. (1);
19:    senão,
20:      se  $(n_{EV_{v2g}}) \wedge (P_{con} + P_U - P_{V2G}^- \geq P_{lim})$  então
21:        se  $P_{con} + P_U - P_{bess}^- \geq P_{lim}$  então
22:           $P_{EV_{SEU}\{u\}} \leftarrow P_{lim, EV_U\{u\}}$ ;
23:          Calcular  $SOC_{k, EV_U\{u\}}$  usando eq. (1);
24:        finaliza se
25:      finaliza se
26:    finaliza se
27:  finaliza para
28: finaliza se

```

---

O algoritmo do modo FAST opera de maneira similar ao algoritmo do modo ULTRA, contendo as mesmas etapas de verificação que o algoritmo do modo ULTRA, mas diferenciando na aplicação da limitação de potência. Além de levar em consideração

$P_{con}$  e  $P_{Fest}$ , o algoritmo do modo FAST também considera a potência de carregamento do modo ULTRA  $P_{Uest}$ , o qual possui a prioridade mais alta. Portanto, a potência estimada da microrrede no algoritmo do modo FAST é assumida como  $P_{gridest} = P_{con} + P_{Uest} + P_{Fest}$  para a análise dos EVs conectados no modo FAST.

Os modos ECO e V2G têm mais premissas de operação do que os outros modos. Durante o carregamento de EVs conectados nos respectivos modos, tanto o ECO quanto o V2G operam sob as mesmas condições, conforme visto nos Algoritmos 3 e 4. Ambos os modos operam no rastreamento da utilização do excedente de geração PV, gerando baixo custo de energia para carregar os EVs conectados, o que é feito pela avaliação dos valores de  $P_{con}$  e  $P_{grid}$  no mesmo instante de tempo  $t$  e já considerando a potência a ser fornecida ao EV avaliado no momento. Além disso, a limitação de potência é verificada acionando-se o Algoritmo 1.

O modo V2G opera com fluxo de potência bidirecional. Portanto, a estimação da potência de carregamento avalia se os EVs carregarão ou descarregarão. Isso é definido pelas variáveis  $SOC$ ,  $P_{con}$  e  $P_{grid}$ , conforme mostrado no Algoritmo 4. Para a operação de descarga, a condição  $P_{grid} \geq P_{lim}$  é verificada e, se for verdadeira, os EVs no modo V2G fornecerão a energia calculada nos modos que atingirem a condição. O fornecimento de energia permanecerá até que o SOC do EV seja inferior ao SOC mínimo definido ou caso a condição limite não seja necessária.

A etapa 3 do algoritmo do modo V2G verifica se o fluxo de potência da rede está acima da demanda contratada considerando a potência fornecida pelos EVs em V2G. Se essa condição for verdadeira e a limitação for necessária para EVs no modo ULTRA, essa é calculada usando a eq. (31) e, automaticamente, a potência FAST será nula. Se a limitação for aplicada somente no modo FAST, então é calculada pela eq. (32). Por último, a etapa 4 faz a distribuição da potência de carregamento no algoritmo V2G e calcula o SOC dos EVs conectados nesse modo. Além disso, se necessário, aplica-se o índice de limitação de potência.

O algoritmo destinado à operação do BESS funciona de maneira similar ao algoritmo utilizado para o modo V2G. Pequenas alterações são feitas apenas, como a potência máxima de carregamento e descarregamento, e toda potência é destinada à somente um elemento. No caso do V2G, a potência total requerida para o carregamento dos EVs nos modos de maior prioridade é dividida entre os EVs V2G conectados na amostra

---

**Algoritmo 3 – Modo ECO.**


---

```

1: se  $n_{EV_E} > 0$  então
2:   Etapa 1 - Estimacão da Potência de Carregamento:
3:   para  $e = 1 : num_{EV_E}$  faça
4:     Etapa 1.1 - Aplicaco das Premissas do Modo ECO:
5:     se  $P_{con} < 0$  então
6:        $P_{calc, EV_E\{e\}} \leftarrow |P_{con}|;$ 
7:       se  $P_{calc, EV_E\{e\}} \geq 0.5 \cdot P_{max, EV_E\{e\}}$  então
8:          $P_{calc, EV_E\{e\}} \leftarrow 0.5 \cdot P_{max, EV_E\{e\}};$ 
9:       finaliza se
10:      Avaliaco de  $P_{grid}$  considerando  $P_{calc, EV_E\{e\}}$ :
11:      se  $P_{con} + P_{EVSE_{tot}} + P_{calc, EV_E\{e\}} \geq 0$  então
12:         $P_{calc, EV_E\{e\}} \leftarrow |P_{con} + P_{EVSE_{tot}}|;$ 
13:        se  $P_{calc, EV_E\{e\}} \geq 0.5 \cdot P_{max, EV_E\{e\}}$  então
14:           $P_{calc, EV_E\{e\}} \leftarrow 0.5 \cdot P_{max, EV_E\{e\}};$ 
15:        finaliza se
16:      finaliza se
17:      se  $P_{grid} \geq 0$  então
18:         $P_{calc, EV_E\{e\}} \leftarrow 0;$ 
19:      finaliza se
20:      seno,
21:         $P_{calc, EV_E\{e\}} \leftarrow 0;$ 
22:      finaliza se
23:      Calcular  $SOC_{est, EV_E\{e\}}$  usando eq. (1);
24:      Calcular  $P_{E_{est}} \leftarrow \sum_{e=1}^{n_{EV_E}} P_{calc, EV_E\{e\}};$ 
25:      Calcular  $P_{grid_{est}} \leftarrow P_{con} + P_{U_{est}} + P_{F_{est}} + P_{E_{est}};$ 
26:      finaliza para
27:      Etapa 2 - Verificaco da Limitaco de Potência no Modo ECO:
28:       $mode \leftarrow ECO;$ 
29:      Executar o Algoritmo 1;
30:      finaliza se
31:      Etapa 3 - Distribuico da Potência de Carregamento:
32:      se  $mode == ECO$  então
33:        para  $e = 1 : num_{EV_E}$  faça
34:          se  $P_{con} + P_U + P_F + P_E < P_{lim}$  então
35:             $P_{EVSE_{E\{e\}}} \leftarrow P_{calc, EV_E\{e\}};$ 
36:            Calcular  $SOC_{k, EV_E\{e\}}$  usando eq. (1);
37:          senão,
38:             $P_{EVSE_{E\{e\}}} \leftarrow P_{lim, EV_E\{e\}};$ 
39:            Calcular  $SOC_{k, EV_E\{e\}}$  usando eq. (1);
40:          finaliza se
41:        finaliza para
42:      finaliza se

```

---

analisada pelo gerenciador. Portanto, o algoritmo do BESS recebe as informacões dos modos de carregamento EV e potência líquida entre a demanda das cargas e geraco PV  $P_{con}$ , assim como a tarifa de energia aplicada no horário, para determinar as potências de carregamento ou descarregamento do BESS.

---

**Algoritmo 4 – Modo V2G**


---

```

1: se  $n_{EV_{v2g}} > 0$  então
2:   Etapa 1 - Estimação da Potência de Carregamento:
3:   para  $v = 1 : num_{EV_{v2g}}$  faça
4:     Etapa 1.1 - Aplicando as Premissas do Modo V2G:
5:     Condições de operação V2G durante o carregamento:
6:     se  $P_{con} < 0$  então
7:        $P_{calc, EV_{v2g}\{v\}} \leftarrow |P_{con}|;$ 
8:       se  $P_{calc, EV_{v2g}\{v\}} \geq 0.5 \cdot P_{max, EV_{v2g}\{v\}}$  então
9:          $P_{calc, EV_{v2g}\{v\}} \leftarrow 0.5 \cdot P_{max, EV_{v2g}\{v\}};$ 
10:      finaliza se Avaliação de  $P_{grid}$  considerando  $P_{calc, EV_{v2g}\{v\}}$ :
11:      se  $P_{con} + P_{EVSE_{tot}} + P_{calc, EV_{v2g}\{v\}} \geq 0$  então
12:         $P_{calc, EV_{v2g}\{v\}} \leftarrow |P_{con} + P_{EVSE_{tot}}|;$ 
13:        se  $P_{calc, EV_{v2g}\{v\}} \geq 0.5 \cdot P_{max, EV_{v2g}\{v\}}$  então
14:           $P_{calc, EV_{v2g}\{v\}} \leftarrow 0.5 \cdot P_{max, EV_{v2g}\{v\}};$ 
15:        finaliza se
16:      finaliza se
17:      se  $P_{grid} \geq 0$  então
18:         $P_{calc, EV_{v2g}\{v\}} \leftarrow 0;$ 
19:      finaliza se
20:    senão,
21:       $P_{calc, EV_{v2g}\{v\}} \leftarrow 0;$ 
22:    finaliza se
23:    Condições de operação V2G durante o descarregamento:
24:    se  $P_{grid} \geq P_{lim}$  então
25:       $P_{calc, EV_{v2g}\{v\}} \leftarrow P_{v2g, EV}^-;$ 
26:      se  $P_{calc, EV_{v2g}\{v\}} \leq -1 \cdot P_{max, EV_{v2g}\{v\}}$  então
27:         $P_{calc, EV_{v2g}\{v\}} \leftarrow -1 \cdot P_{max, EV_{v2g}\{v\}};$ 
28:      finaliza se
29:      Limite de SOC mínimo:
30:      se  $SOC_{EV_{v2g}\{v\}} \leq 40\%$  então
31:         $P_{calc, EV_{v2g}\{v\}} \leftarrow 0;$ 
32:      finaliza se
33:    finaliza se
34:    Calcular  $SOC_{est, EV_{v2g}\{v\}}$  usando eq. (1);
35:    Calcular  $P_{v2g_{est}} \leftarrow \sum_{v=1}^{n_{EV_{v2g}}} P_{calc, EV_{v2g}\{v\}};$ 
36:     $P_{grid_{est}} \leftarrow P_{con} + P_{U_{est}} + P_{F_{est}} + P_{E_{est}} + P_{v2g_{est}};$ 
37:    finaliza para
38:  Etapa 2 - Verificação da Limitação de Potência no Modo V2G:
39:   $mode \leftarrow V2G;$ 
40:  Executar o Algoritmo 1;
41: finaliza se
42: Etapa 3 - Distribuição de Potência no Modo V2G:
43: se  $mode == V2G$  então
44:   para  $v = 1 : num_{EV_{v2g}}$  faça
45:     se  $P_{con} + P_U + P_F + P_E + P_{v2g} < P_{lim}$  então
46:        $P_{EVSE_{v2g}\{v\}} \leftarrow P_{calc, EV_{v2g}\{v\}};$ 
47:       Calcular  $SOC_{k, EV_{v2g}\{v\}}$  usando eq. (1);
48:     senão,
49:        $P_{EVSE_{v2g}\{v\}} \leftarrow P_{lim, EV_{v2g}\{v\}};$ 
50:       Calcular  $SOC_{k, EV_{v2g}\{v\}}$  usando eq. (1);
51:     finaliza se
52:   finaliza para
53: finaliza se

```

---

Os algoritmos apresentados funcionam de forma modular. O primeiro algoritmo a ser executado, após as medições de potência da microrrede e as informações dos EVs conectados às estações de recarga no estacionamento, refere-se ao modo ULTRA. Portanto, a execução dos algoritmos segue a ordem de prioridade dos modos de carregamento do ULTRA para o V2G, conforme descrito anteriormente na Seção 3.3 e no fluxograma apresentado na Figura 7.

### 3.5 SISTEMAS BASEADOS EM LÓGICA FUZZY PARA CARREGAMENTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

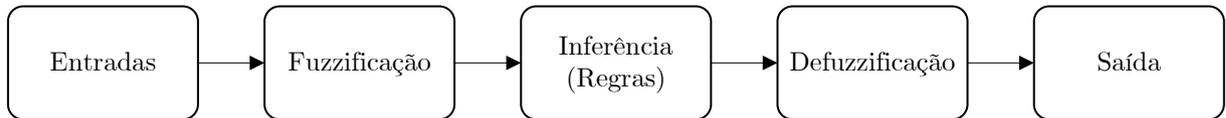
No contexto de gerenciamento de EVs em microrredes, a lógica fuzzy pode ser usada para desenvolver um algoritmo inteligente de carregamento que leve em consideração diversos fatores, como capacidade da bateria do EV, taxa de carga/descarga da bateria, demanda de energia e disponibilidade de energia renovável. O algoritmo pode utilizar a lógica fuzzy para representar os relacionamentos imprecisos e incertos entre essas variáveis e tomar decisões com base no grau de pertinência de cada variável a um determinado conjunto (HUSSAIN *et al.*, 2019; PARMAR; TIWARI, 2020; GHOLAMI MAJID MEHRASA, 2022; ABRAHAM *et al.*, 2023).

O algoritmo pode usar conjuntos fuzzy para representar o grau de nível de carga da bateria (baixo, médio e alto) e o grau de disponibilidade de energia renovável (baixo, médio e alto). As regras podem ser definidas usando a lógica fuzzy para determinar o carregamento, e descarregamento no caso V2G, para cada EV com base nesses fatores (HUSSAIN *et al.*, 2019; ALI *et al.*, 2022; GHOLAMI MAJID MEHRASA, 2022; ABRAHAM *et al.*, 2023).

A lógica fuzzy é uma estratégia utilizada para lidar com incertezas e imprecisões na tomada de decisões. Ao contrário da lógica tradicional que assume valores binários para as variáveis, a lógica fuzzy permite que as variáveis tenham um grau de pertinência em um intervalo de valores. O grau de pertinência indica o quanto um elemento pertence ou não a determinado conjunto (ZADEH, 1965).

A arquitetura de um sistema de inferência fuzzy, do inglês *fuzzy inference system* (FIS), é mostrada na Figura 8. A primeira etapa se refere a escolha aos parâmetros de entrada do sistema. Na segunda etapa, ocorre o processo de fuzzificação que consiste em classificar a amplitude das entradas e saída em conjuntos fuzzy através dos conjuntos de descritores linguísticos e funções de pertinência. A próxima etapa é a aplicação das regras

que relacionam os conjuntos de entrada ativados na etapa anterior com os conjuntos de saída esperados. Por fim, ocorre o processo de defuzzificação, em que os conjuntos de saída ativados por graus de pertinência dos conjuntos de entrada são convertidos em um valor real para a saída.



**Figura 8 – Arquitetura do sistema de inferência fuzzy.**

Pesquisas como de Mohamed *et al.* (2014), Teng *et al.* (2017) e Nour *et al.* (2019) utilizaram lógica fuzzy para o carregamento de EVs, incluindo previsão de dados baseados em métodos de probabilidade e estatística, analisando dados coletados durante anos do perfil de demanda de cargas e geração PV para construir curvas de distribuição. Teng *et al.* (2017) propôs um carregador de EV controlado totalmente descentralizado que é capaz de mitigar o impacto do carregamento de EV nas redes elétricas. Um controle de lógica fuzzy é usado no carregador EV para integrar as medições da rede elétrica, carregador EV e bateria EV, como tensão da rede e SOC da bateria EV, para ajustar o corrente de carregamento. Segundo Teng *et al.* (2017) em seu trabalho, o controle automático da corrente de carregamento pode ser estendido diretamente para o controle automático da potência de carregamento. São necessárias apenas alterações na função de associação da mudança percentual da corrente de carregamento para a mudança de percentual da potência de carregamento EV.

Um novo sistema de controle supervisório (SCS) projetado para manter o equilíbrio de energia e obter benefício econômico com a venda de energia para a rede é apresentado por García-Triviño *et al.* (2023). Esse sistema consiste em uma microrrede com energia renovável PV, sistemas de armazenamento de energia (bateria e sistema de hidrogênio) e estação de carregamento para EV conectada a um link de corrente contínua de média tensão. O SCS proposto por García-Triviño *et al.* (2023) compreende dois subsistemas, o primeiro subsistema é baseado em lógica fuzzy que modifica o valor da potência líquida na microrrede dependendo do preço da energia ao usar a rede e o segundo subsistema realiza o despacho de energia entre os componentes do sistema. O sistema de lógica fuzzy modifica o valor da potência líquida da microrrede usado no sistema de despacho de energia para obter um benefício econômico do uso da rede.

Um algoritmo de gerenciamento de energia em tempo real baseado em um conjunto de níveis de prioridade para EVs é desenvolvido em Mohamed *et al.* (2014). Os EVs são movidos de um nível de prioridade para outro e, portanto, tratados de forma diferente, com base em seu SOC e no tempo restante para o horário de partida. O algoritmo desenvolvido permite funcionalidades V2G e V2V e permite que o custo total da energia consumida pelos EVs seja reduzido. Além disso, o processo de carregamento dos EVs é tratado de forma que seus impactos na rede elétrica sejam mitigados. Um controlador fuzzy é utilizado para determinar a taxa de carregamento de cada EV, considerando tarifa de energia e demanda de carga.

Portanto, a aplicação da lógica fuzzy no gerenciamento do carregamento de EVs em microrredes com geração PV, levando em consideração o SOC da bateria, o preço da energia da rede e a potência de carregamento dos EVs, pode ser abordada em um modelo de controle fuzzy como feito nos trabalhos citados. Nesse contexto, a lógica fuzzy pode ser utilizada para criar regras e definir conjuntos fuzzy que representam as diferentes condições e variáveis envolvidas no processo de carregamento dos EVs. Esses conjuntos fuzzy podem ser usados para mapear a relação entre o SOC da bateria, o preço da energia e a potência de carregamento, permitindo a tomada de decisões de gerenciamento de energia de forma mais precisa.

Uma maneira de como a lógica fuzzy pode ser aplicada nesse contexto é considerando como variáveis de entrada o SOC da bateria dos EVs, o preço de energia e o excedente de geração PV, as quais podem ser divididas em conjuntos fuzzy como baixo, médio e alto. Já como variável de saída teria-se a potência de carregamento a ser aplicada aos EVs. A partir disso, podem ser definidas regras que mapeiam as condições das variáveis de entrada para a variável de saída, por exemplo: se o SOC da bateria EV é baixo e o preço de energia é baixo, então a potência de carregamento é ajustada para alta.

Além disso, limites e formas dos conjuntos fuzzy para cada variável são definidos. Por exemplo, poderia ser trabalhado considerando os seguintes níveis para o SOC da bateria: baixo (20-40%), médio (30-80%) e alto (70-100%). Já para o preço de energia, os níveis seriam definidos conforme os horários fora de ponta, intermediário e de ponta, podendo ser classificados como favorável, normal e desfavorável. Então, com base nas regras fuzzy e nos valores de entrada é realizada a inferência fuzzy para determinar a potência de carregamento dos EVs.

### 3.5.1 Sistema de Inferência Fuzzy

Conceitos de lógica fuzzy são acrescentados nos modos de carregamento ECO e V2G dos EVs e na operação do BESS. O intuito dessa abordagem é melhorar a resposta do gerenciamento, atendendo diferentes cenários e condições de operação, e conseguindo trazer flexibilidade e confiabilidade no carregamento dos EVs. As regras estabelecidas para o gerenciamento das estações de carregamento de EVs e operação do BESS serviram como base para a elaboração e implementação de um sistema de inferência fuzzy. O FIS tem como objetivo otimizar a determinação da potência de carregamento para os EVs nos modos ECO e V2G e melhorar a operação do BESS. O novo sistema será capaz de gerenciar as incertezas e diferentes níveis de carregamento de forma mais dinâmica.

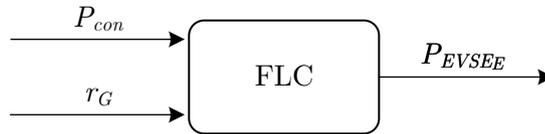
Criou-se conjuntos de regras fuzzy para o modo ECO, no qual o custo de carregamento é o fator principal de decisão. Além disso, desenvolveu-se outro conjunto de regras fuzzy para o carregamento no modo V2G, em que o custo de carregamento e suporte à rede baseado no preço da tarifa de energia e limitação da potência contratada são fatores principais de decisão. Por fim, fez-se o mesmo para a operação do BESS, que pode carregar durante excedente de geração ou baixo custo de energia e vender quando o custo é alto, fornecendo suporte à microrrede e trazendo benefícios econômicos ao proprietário do estacionamento.

Portanto, sistemas de inferência fuzzy serão aplicados separadamente para os modos ECO e V2G e para a operação do BESS, utilizando a abordagem de controladores de lógica fuzzy, do inglês *fuzzy logic controller* (FLC). Os controladores de lógica fuzzy são projetados para definir a potência de carregamento, ou descarregamento se for o caso do V2G, dos EVs conectados nesses modos e a potência de carga e descarga do BESS. Complementando-se, uma média móvel discreta foi adicionada para evitar variações bruscas nas potências de carregamento EV, causadas principalmente em cenários em que a geração PV possui alta intermitência.

### 3.5.2 Controlador de Lógica Fuzzy do Modo ECO

O FLC para o modo ECO foi projetado com o objetivo de determinar a taxa de carregamento fornecido por uma estação de carregamento EV operando nesse modo. Os parâmetros de entrada escolhidos foram a potência líquida entre geração PV e demanda

de cargas ( $P_{con}$ ) e a tarifa de energia ( $r_G$ ). O parâmetro de saída, e também o objetivo a ser alcançado aplicando a inferência fuzzy, é a potência de carregamento ( $P_{EVSE_E}$ ) para o EV no modo ECO. A estrutura do FLC para o modo ECO é apresentado na Figura 9, no qual estão presentes os parâmetros de entrada e de saída.



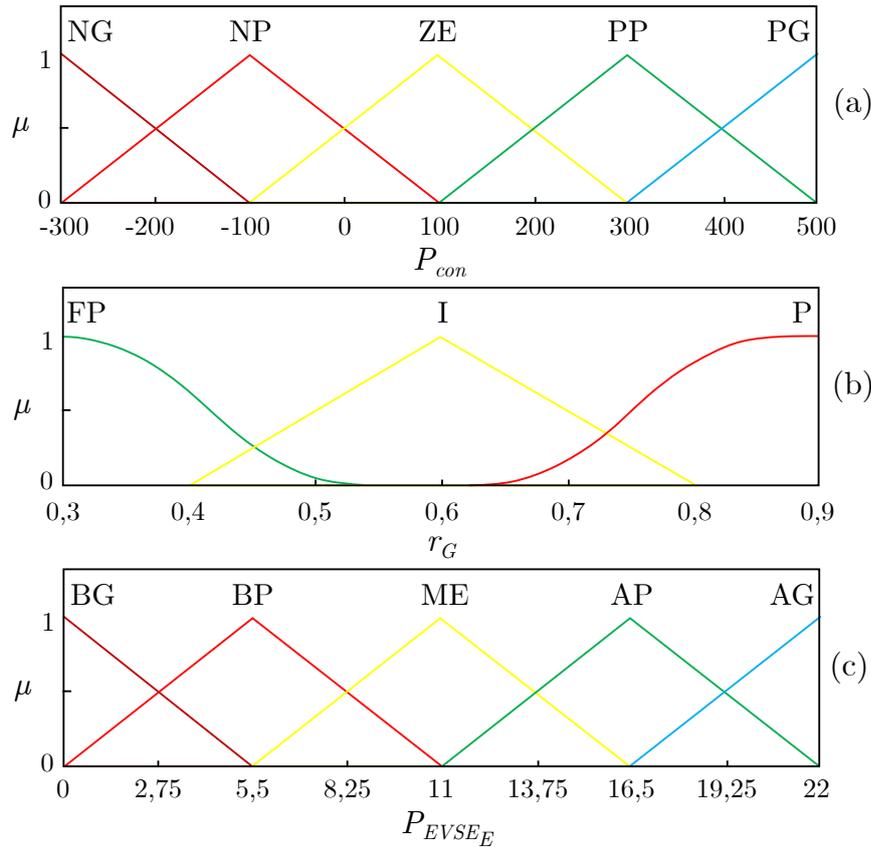
**Figura 9 – FLC para o modo ECO.**

Os parâmetros de entrada e saída do FLC possuem intervalos a serem considerados e aplicados durante o processo executado pelo sistema de inferência fuzzy. Para o modo ECO, a variável  $P_{con}$  é considerada no intervalo de  $-300$  a  $500$  kW,  $r_G$  possui uma faixa de  $0,3$  a  $0,9$  R\$/kWh e  $P_{EVSE_E}$  pode assumir valores de  $0$  a  $22$  kW. Os valores dos intervalos foram definidos conforme os níveis de potência mínimo e máximo que as variáveis podem atingir.

O próximo passo é definir os conjuntos fuzzy para o processo de fuzzificação, o qual atribui descritores linguísticos a cada conjunto, categorizando o valor de entrada ou saída por tamanho. Para  $P_{con}$  foram escolhidos os conjuntos negativo grande (NG), negativo pequeno (NP), zero (ZE), positivo pequeno (PP) e positivo grande (PG). Para  $r_G$  definiu-se os conjuntos fora de ponta (FP), intermediário (I) e ponta (P), os quais também poderiam ser considerados como favorável, normal e desfavorável. Para a saída  $P_{EVSE_E}$  foram atribuídos os conjuntos baixo grande (BG), baixo pequeno (BP), médio (ME), alto pequeno (AP) e alto grande (AG).

A partir dos conjuntos fuzzy definidos, são atribuídas para cada entrada e para a saída funções de pertinência que indicam o quanto cada valor pertence aos conjuntos de descritores linguísticos. Tais funções foram definidas testando suas respostas no sistema em diferentes formas, sendo escolhidas aquelas que resultaram em um perfil de saída melhor. As funções de pertinência adotadas para representar os conjuntos escolhidos para cada entrada e saída do modo ECO são mostradas na Figuras 10. O eixo vertical indica o quanto cada valor do eixo horizontal pertence a cada conjunto, em uma classificação de  $0\%$  a  $100\%$ . Portanto, nota-se que um mesmo valor pode pertencer a dois conjuntos ao mesmo tempo, com um respectivo grau de pertinência para cada conjunto.

A etapa seguinte é a aplicação das regras que relacionam os conjuntos de entrada



**Figura 10 – Funções de pertinência do FLC para o modo ECO das entradas (a)  $P_{con}$ , (b)  $r_G$  e da saída (c)  $P_{EVSE_E}$ .**

ativados pelo sistema de inferência fuzzy na etapa de fuzzificação com os conjuntos de saída esperados. As regras de controle que relacionam as entradas  $P_{con}$  e  $r_G$  com a saída  $P_{EVSE_E}$  são apresentadas na Tabela 2. Tais regras foram escolhidas baseadas nas premissas adotadas para o funcionamento do modo ECO, atendendo diferentes faixas de valores conforme os parâmetros de entrada considerados.

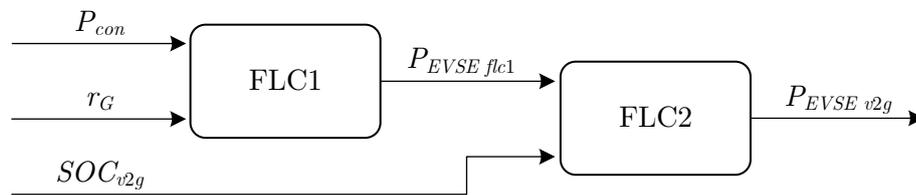
**Tabela 2 – Regras para determinar a potência de carregamento EV do modo ECO.**

		$P_{con}$				
		NG	NP	ZE	PP	PG
$r_G$	FP	PG	PG	PP	ZE	ZE
	I	PG	PP	ZE	ZE	ZE
	P	PG	PP	ZE	ZE	ZE

A próxima etapa é o processo de defuzzificação em que os conjuntos de saída ativados por graus de pertinência dos conjuntos de entrada são convertidos em um valor real, que nesse caso é a potência de carregamento dos EVs. Utilizou-se o método do centróide para a defuzzificação, o qual fornece um valor real a partir do cálculo do centro de gravidade da área ativada nas funções de pertinência da saída.

### 3.5.3 Controlador de Lógica Fuzzy do Modo V2G

No modo V2G projetou-se um sistema de inferência fuzzy em árvore para determinar a taxa de carregamento e descarregamento fornecida por uma estação de carregamento EV operando em V2G. Em uma estrutura em árvore, as saídas dos sistemas fuzzy de baixo nível são usadas como entradas para os sistemas fuzzy de alto nível. O FIS para o modo V2G é composto por dois FLCs, como mostrado na Figura 11, em que o primeiro controlador fuzzy (FLC1) calcula a potência de carregamento e descarregamento EV ( $P_{EVSE_{flc1}}$ ) para o modo V2G baseada no excedente de geração PV analisado por  $P_{con}$  e na tarifa de energia  $r_G$ . A saída do FLC1 então passa a ser um parâmetro de entrada para o segundo controlador fuzzy (FLC2), o qual irá determinar a potência de carregamento e descarregamento EV final ( $P_{EVSE_{v2g}}$ ) para o modo V2G, baseada agora na potência  $P_{EVSE_{flc1}}$  calculada anteriormente e no  $SOC$  do EV conectado nesse modo. Portanto, a partir disso é possível obter uma potência de carregamento e descarregamento que atenda as premissas estabelecidas para o modo V2G.



**Figura 11 – Sistema de inferência fuzzy em árvore para modo V2G.**

Os conjuntos fuzzy escolhidos para o parâmetro de entrada  $P_{con}$  do FLC1 são negativo grande (NG), negativo pequeno (NP), zero (ZE), positivo pequeno (PP) e positivo grande (PG). Para  $r_G$  atribuiu-se os conjuntos fora de ponta (FP), intermediária (I) e ponta (P). Nota-se que os conjuntos fuzzy para os parâmetros de entrada do FLC1 do modo V2G são iguais aos do modo ECO, uma vez que esses dependem de características da microrrede e são abordados pelas premissas dos respectivos modos de carregamento EV. Entretanto, a diferença aparece nos conjuntos fuzzy para o parâmetro de saída  $P_{EVSE_{flc1}}$ , os quais são definidos como sendo negativo grande (NG), negativo pequeno (NP), zero (ZE), positivo pequeno (PP) e positivo grande (PG). Tais conjuntos são escolhidos assim devido ao fato do modo V2G operar podendo carregar ou descarregar o EV conectado no modo, logo é necessário abranger potências positivas e negativas na saída.

As funções de pertinência adotadas para representar os conjuntos fuzzy escolhidos

para o FLC1 são apresentadas na Figura 12. Verifica-se na Figura 12(c) a potência de saída abrangendo valores positivos a negativos como já mencionado para os EVs no modo V2G. As regras que relacionam os conjuntos de entrada ativados pelo FLC1 na etapa de fuzzificação com os conjuntos de saída esperados para o modo V2G são mostradas na Tabela 3.

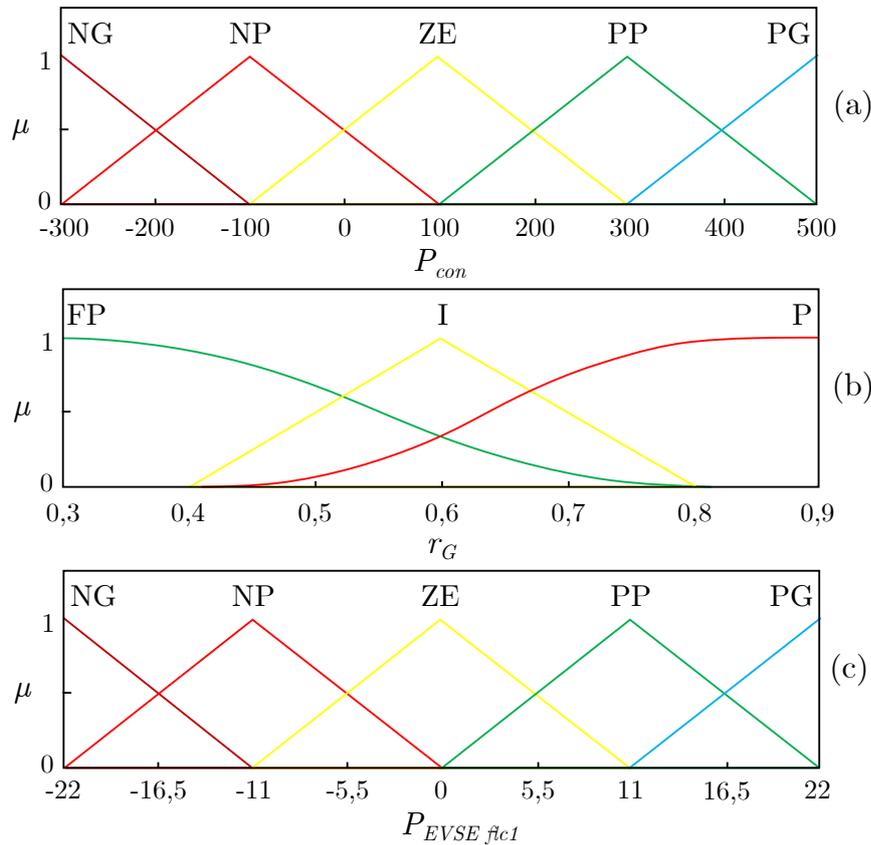
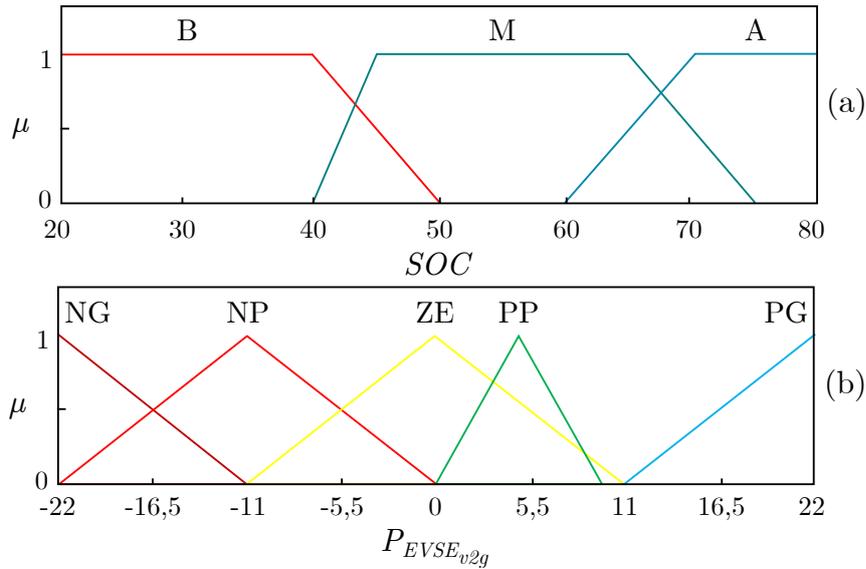


Figura 12 – Funções de pertinência do FLC1 para o modo V2G das entradas (a)  $P_{con}$ , (b)  $r_G$  e da saída (c)  $P_{EVSE1}$ .

Tabela 3 – Regras FLC1 para determinar a potência de carregamento e descarregamento  $P_{EVSEflc1}$  do EV V2G.

		$P_{con}$				
		NG	NP	ZE	PP	PG
$r_G$	FP	PG	PG	ZE	ZE	ZE
	I	PG	PP	NP	NP	NG
	P	PG	PP	NP	NG	NG

Para o FLC2 do modo V2G as funções de pertinências de entrada e saída são apresentadas pela Figura 13, na qual são mostradas as funções para os parâmetros de entrada SOC e de saída  $P_{EVSEv2g}$ , que será a potência aplicada ao EV. O outro parâmetro de entrada do FLC2 consiste na saída  $P_{EVSEflc1}$  do FLC1, tendo suas funções de pertinência ilustradas na Figura 12(c).



**Figura 13** – Funções de pertinência do FLC2 para o modo V2G da entrada (a)  $SOC$  e da saída (b)  $P_{EVSE_{v2g}}$ .

As regras utilizadas pelo FLC2 para determinar a potência de carregamento e descarregamento  $P_{EVSE_{v2g}}$  dos EVs conectados no modo V2G são apresentadas na Tabela 4. Portanto, a partir dessas o processo de defuzzificação converte os conjuntos ativados de funções de pertinência na potência de referência para a estação de recarga na qual o EV V2G está conectado.

**Tabela 4** – Regras FLC2 para determinar a potência de carregamento e descarregamento  $P_{EVSE_{v2g}}$  do EV V2G.

		$P_{EVSE_{flc1}}$				
		NG	NP	ZE	PP	PG
$SOC$	B	ZE	ZE	PP	PP	PG
	M	NP	NP	ZE	PP	PG
	A	NG	NP	NP	PP	PP

### 3.5.4 Controlador de Lógica Fuzzy para Operação do BESS

A determinação da potência de carregamento e descarregamento do BESS também é baseada na utilização de um sistema de inferência fuzzy em árvore. O sistema é composto por dois FLCs conforme apresentado na Figura 14. O primeiro controlador fuzzy (FLC1) calcula a potência de operação do BESS com base nas variáveis  $P_{con}$  e  $r_G$ . Já o segundo controlador fuzzy (FLC2) determina o nível de potência de carga ou descarga do BESS através da saída do FLC1  $P_{bessflc1}$  e o parâmetro  $SOC_{bess}$  que representa o SOC atual do sistema de baterias.

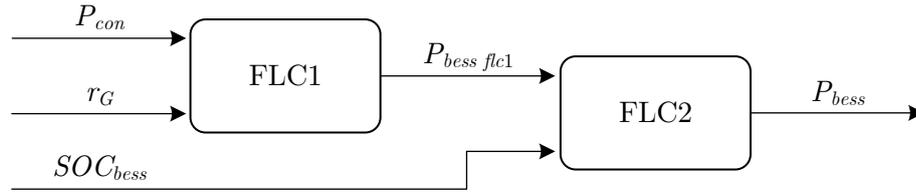


Figura 14 – Sistema de inferência fuzzy em árvore para operação do BESS.

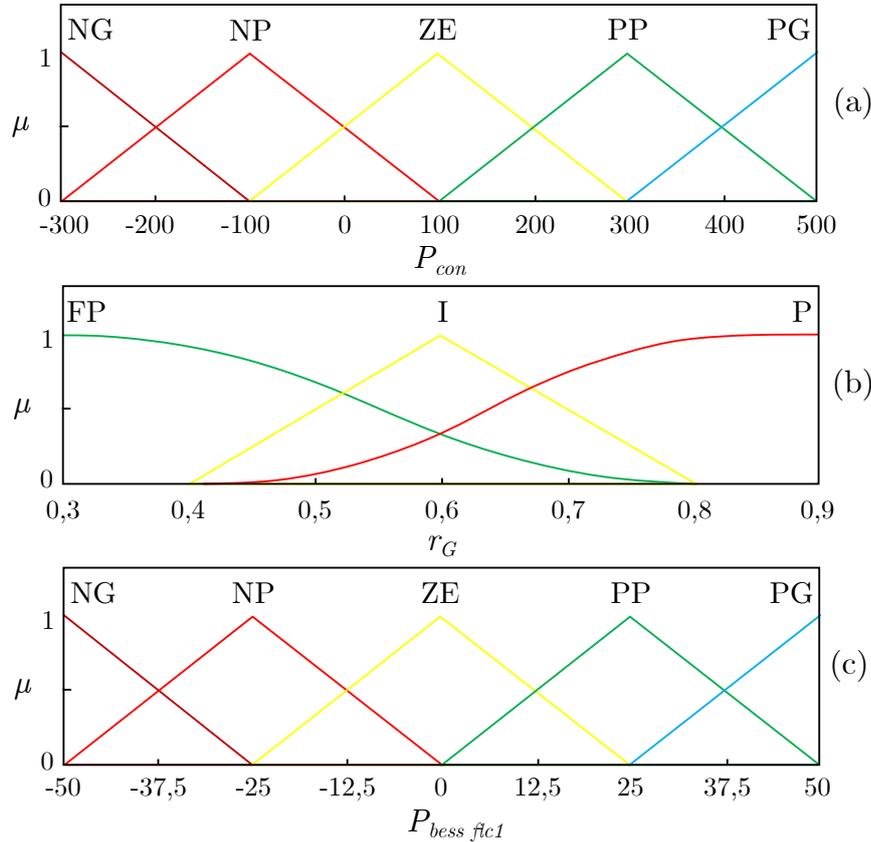


Figura 15 – Funções de pertinência do FLC1 para o BESS das entradas (a)  $P_{con}$ , (b)  $r_G$  e da saída (c)  $P_{bess\_flc1}$ .

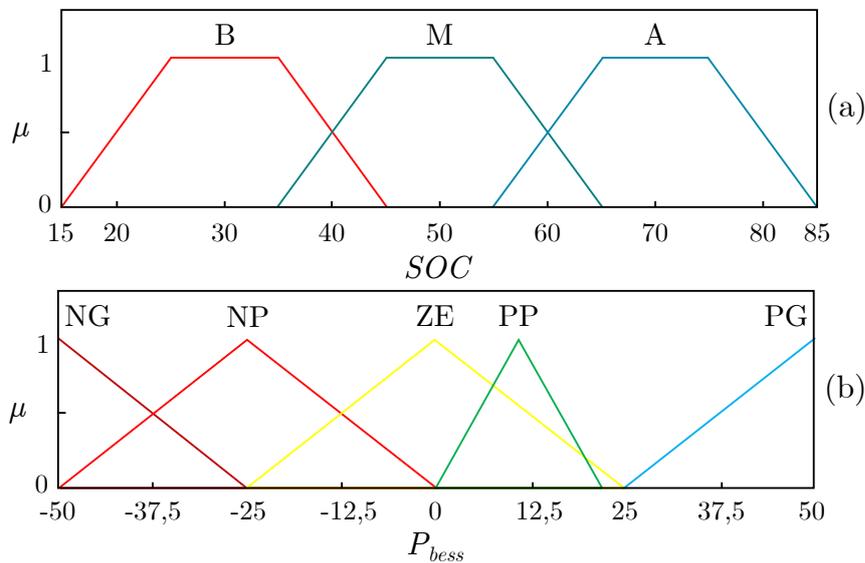
Para cada parâmetro, de entrada e saída, do FLC1 foram determinados conjuntos fuzzy para categorizar os valores de entrada ou saída por tamanho. Os parâmetros  $P_{con}$  e  $r_G$  possuem os mesmos conjuntos definidos nos modos anteriores, uma vez que não se alteram pelo carregamento dos EVs na microrrede. Para o parâmetro  $P_{bess\_flc1}$  são definidos os conjuntos fuzzy negativo grande (NG), negativo pequeno (NP), zero (ZE), positivo pequeno (PP) e positivo grande (PG).

As funções de pertinência escolhidas para o FLC1 que relacionam os conjuntos fuzzy definidos e os respectivos valores dos intervalos da operação do BESS são apresentadas na Figura 15. Já as regras do FLC1 que determinam a potência  $P_{bess\_flc1}$  relacionando os parâmetros de entrada do sistema são organizadas na Tabela 5, abrangendo as potências positivas e negativas de operação do BESS.

**Tabela 5 – Regras FLC1 para determinar a potência de carregamento e descarregamento  $P_{bessflc1}$  do BESS.**

		$P_{con}$				
		NG	NP	ZE	PP	PG
$r_G$	FP	PG	PG	ZE	ZE	ZE
	I	PG	PP	NP	NP	NG
	P	PG	PP	NP	NG	NG

O FLC2 possui suas funções de pertinência referentes aos parâmetros de entrada e saída representadas na Figura 16. Nota-se que o perfil das funções de pertinência para o SOC do BESS são diferentes em relação as funções de pertinência adotadas para o modo V2G. Isso ocorre devido a faixa de SOC de operação adotada para cada elemento conforme as premissas definidas, fazendo total diferença durante os processos de inferência fuzzy.



**Figura 16 – Funções de pertinência do FLC2 para o BESS da entrada (a)  $SOC$  e da saída (b)  $P_{bess}$ .**

As regras adotadas para o FLC2 que determina a potência de carregamento e descarregamento do BESS são mostradas na Tabela 6. Verifica-se os parâmetros de entrada  $P_{bessflc1}$  e  $SOC$  que relacionam o conjunto fuzzy de saída desejado conforme os conjuntos fuzzy apresentados na entrada do FLC2. Portanto, no processo de defuzzificação os conjuntos fuzzy de saída ativados são convertidos no valor real da potência de referência para a operação do BESS.

**Tabela 6 – Regras FLC2 para determinar a potência de carregamento e descarregamento  $P_{bess}$  do BESS.**

		$P_{bessflc1}$				
		NG	NP	ZE	PP	PG
$SOC$	B	ZE	ZE	PP	PP	PG
	M	NP	NP	ZE	PP	PG
	A	NG	NP	NP	PP	PG

### 3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentada a estrutura da microrrede com estacionamento de EVs, geração fotovoltaica e um sistema de armazenamento de energia de baterias, juntamente com a modelagem matemática desses elementos. Em seguida, foram definidos os modos de carregamento EV e as estratégias de gerenciamento das estações de carregamento, levando em consideração as premissas de operação adotadas para cada modo EV. Por último, apresentou-se a estrutura de gerenciamento baseada em lógica fuzzy, onde aplicou-se essa abordagem para os modos ECO e V2G e para operação do BESS, obtendo-se as regras para o cálculo da potência de carregamento dos EVs e BESS.

## 4 ANÁLISE E VERIFICAÇÃO DO GERENCIAMENTO DE SISTEMAS DE CARREGAMENTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

### 4.1 INTRODUÇÃO

O capítulo 3 apresentou a estrutura da microrrede e o sistema de gerenciamento proposto para sistemas de carregamento de EVs e de um BESS. Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos em simulação, inicialmente para o gerenciamento baseado em regras e, posteriormente, para o gerenciamento com lógica fuzzy. Para esse último, são analisados e apontadas as diferenças para três cenários diferentes de geração PV e como cada um afeta as potências na microrrede e as taxas de carregamento dos EVs e do BESS.

### 4.2 SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE GERENCIAMENTO BASEADO EM REGRAS

A estratégia de carregamento de EV proposta é avaliada em simulação com base nos modelos apresentados dos elementos da rede e dos modos de carregamento de EVs. Os perfis de potência de geração PV e demanda de carga, mostrados na Figura 17, são relativos a dados de medições feitas na Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Pato Branco, modificados apenas em escala para se adequar melhor ao propósito desse trabalho. A Figura 17 também apresenta a tarifa de energia.

Considerando um total de vinte e quatro EVs conectados em horários distribuídos ao longo de um dia, em que há quatro EVs no modo FAST, quatro no modo ECO, quatro no modo V2G e o restante no modo ULTRA, a Figura 18 ilustra o impacto do carregamento de EVs na demanda de uma microrrede sem gerenciamento de energia ( $P_{grid [conv]}$ ). Há períodos em que a demanda da rede excede a potência contratada devido à inserção de EVs para carregamento. Portanto, há uma necessidade de um EMS, que deve coordenar adequadamente as estações de carregamento de EVs na microrrede, considerando a demanda de potência de pico e o excedente de geração PV. O efeito da inserção do EMS na demanda da microrrede é apresentado na Figura 18 pela curva  $P_{grid [EMS]}$ .

O EMS proposto gerencia as estações de carregamento de EVs com base no modo de carregamento escolhido pelo usuário do EV. Além disso, o EMS também gerencia um BESS incluído na microrrede. O BESS foi adicionado ao sistema para dar suporte ao modo

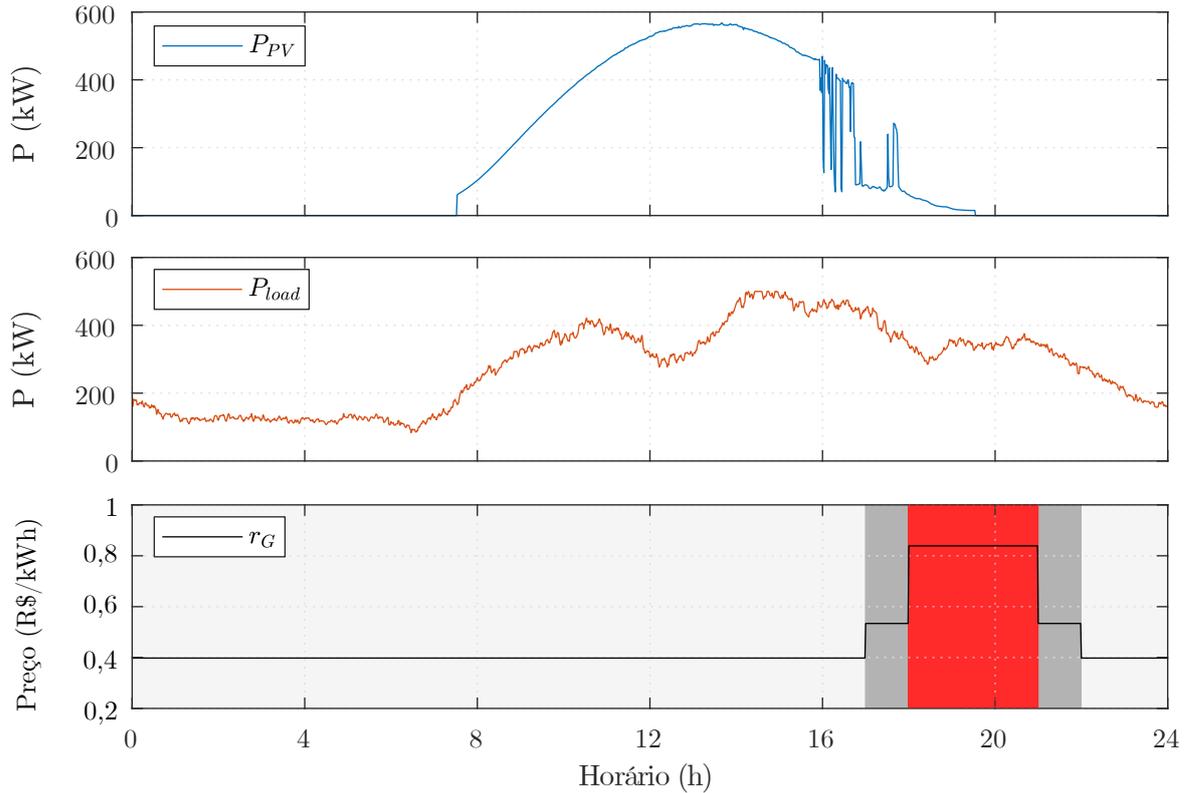


Figura 17 – Perfis da potência de geração PV ( $P_{PV}$ ), demanda de carga ( $P_{load}$ ) e tarifa de energia ( $r_G$ ).

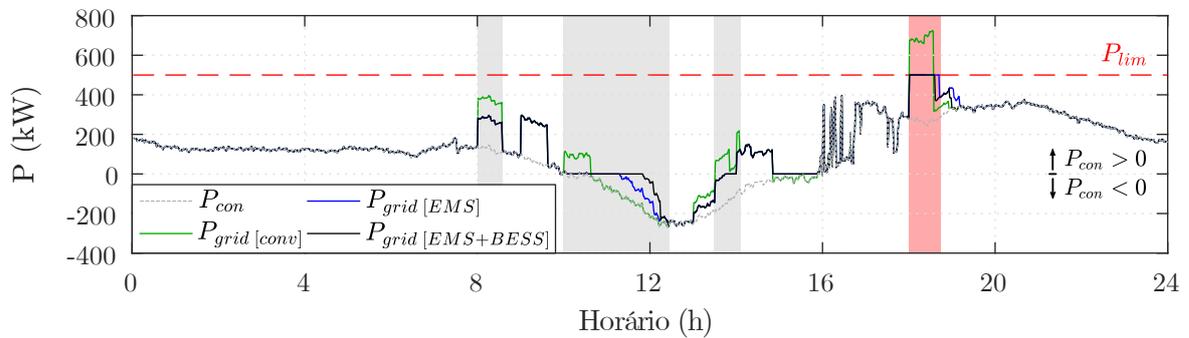


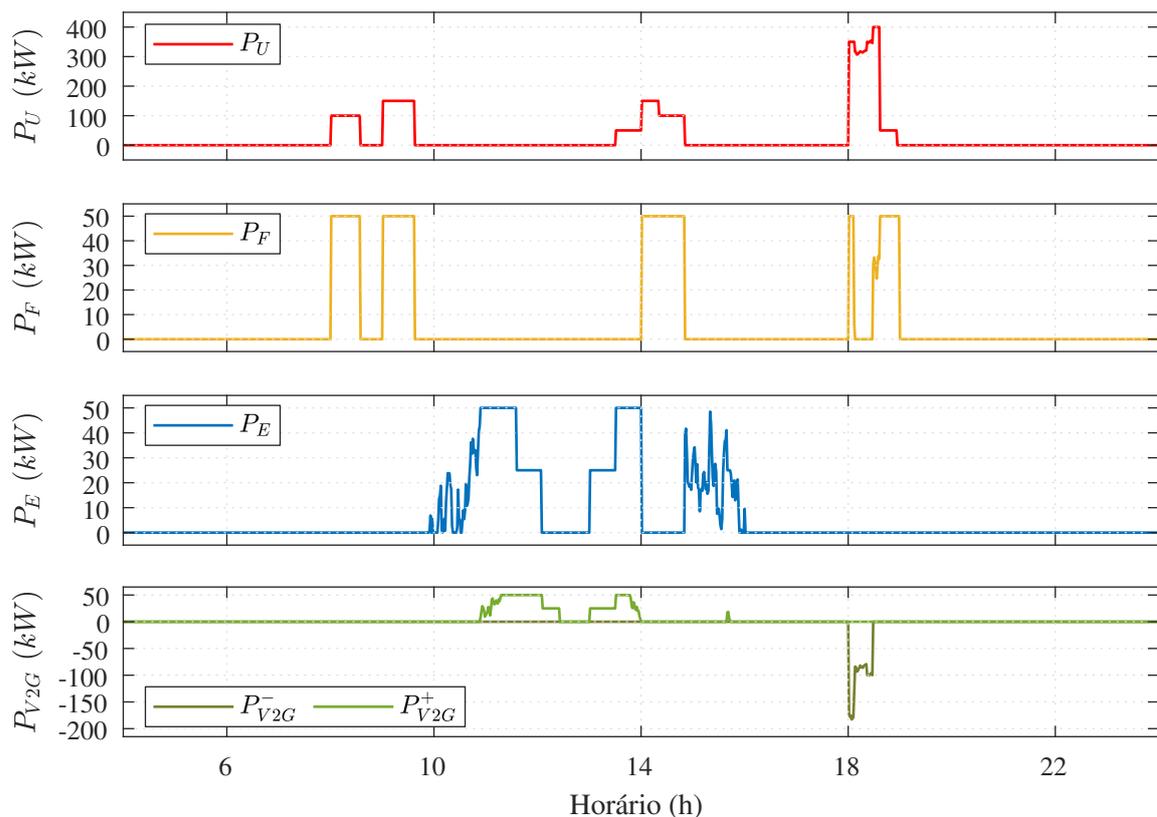
Figura 18 – Impacto do carregamento de EVs na demanda da microrrede. Sem EMS e BESS ( $P_{grid [conv]}$ ). Com EMS e sem BESS ( $P_{grid [EMS]}$ ). Com EMS e BESS ( $P_{grid [EMS+BESS]}$ ).

V2G, carregando os EVs durante os horários de pico de potência e quando há um excesso de demanda de energia contratada na microrrede. O efeito do EMS na microrrede com o fluxo de potência ativa do BESS é ilustrado na Figura 18 pela curva  $P_{grid [EMS+BESS]}$ .

Na Figura 18, as curvas  $P_{grid [conv]}$  e  $P_{grid [EMS+BESS]}$  demonstram um deslocamento na demanda antes das 10h, quando ocorre um excedente de geração PV. O deslocamento de parte da demanda de carregamento de EVs para o horário de excesso de geração PV (quando  $P_{con} < 0$ ) diminui significativamente a demanda de energia às 8h. Além disso, no cenário de análise da curva  $P_{grid [conv]}$ , a potência de carregamento dos EVs causa um excesso na demanda de energia contratada na microrrede no período horário

entre 18h e 18:30h. Portanto, para evitar esse excesso de demanda durante o carregamento dos EVs na microrrede, o EMS monitora e gerencia a potência de carregamento dos EVs e envia comandos de referência para a potência de descarregamento dos EVs no modo V2G e do BESS para fornecer suporte à microrrede.

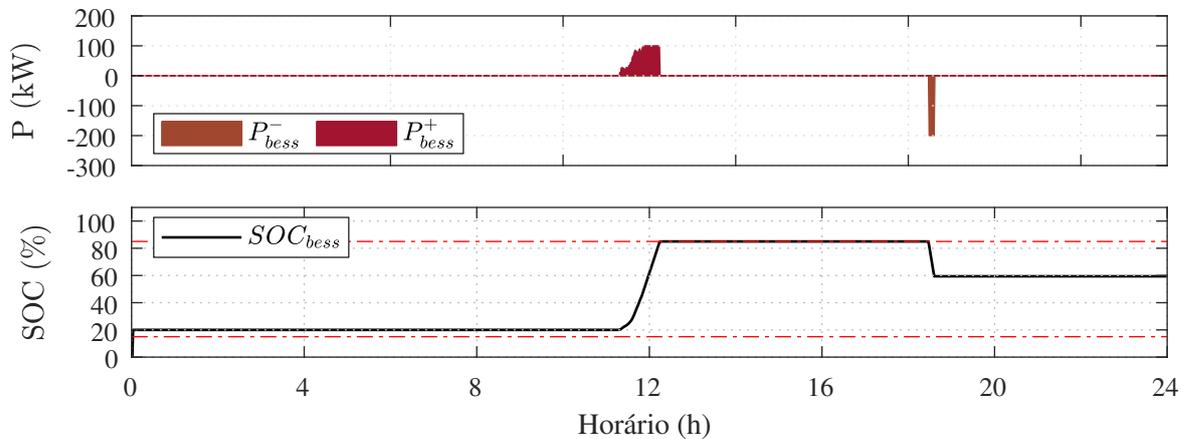
A Figura 19 apresenta a potência de cada modo de carregamento EV conectado no estacionamento da microrrede. O modo ULTRA é o modo que exige a maior potência de carregamento, seguido pelo modo FAST. No modo ECO, a potência de carregamento dos EVs é variável em determinados períodos, resultando em flutuações de potência próximas à restrição  $P_{con} < 0$ , causadas pelo baixo nível de geração PV. Além disso, a Figura 19 ilustra a potência do modo V2G, considerando sua operação bidirecional, em que verifica-se que os EVs conectados nesse modo começam a carregar, conforme indicado por  $P_{V2G}^+$ , quando a potência do modo ECO é estabilizada e suficiente. No instante em que a potência  $P_{lim}$  é ultrapassada, a operação de suporte V2G começa a atuar, conforme indicado por  $P_{V2G}^-$ .



**Figura 19 – Potências dos modos de carregamento dos EVs conectados à microrrede.**

A potência e o SOC do BESS na microrrede são mostrados na Figura 20. Inicialmente, a potência do BESS é limitada à potência excedente PV disponível, assim como ocorre com os EVs nos modos ECO e V2G. Depois de um certo período, a potência de

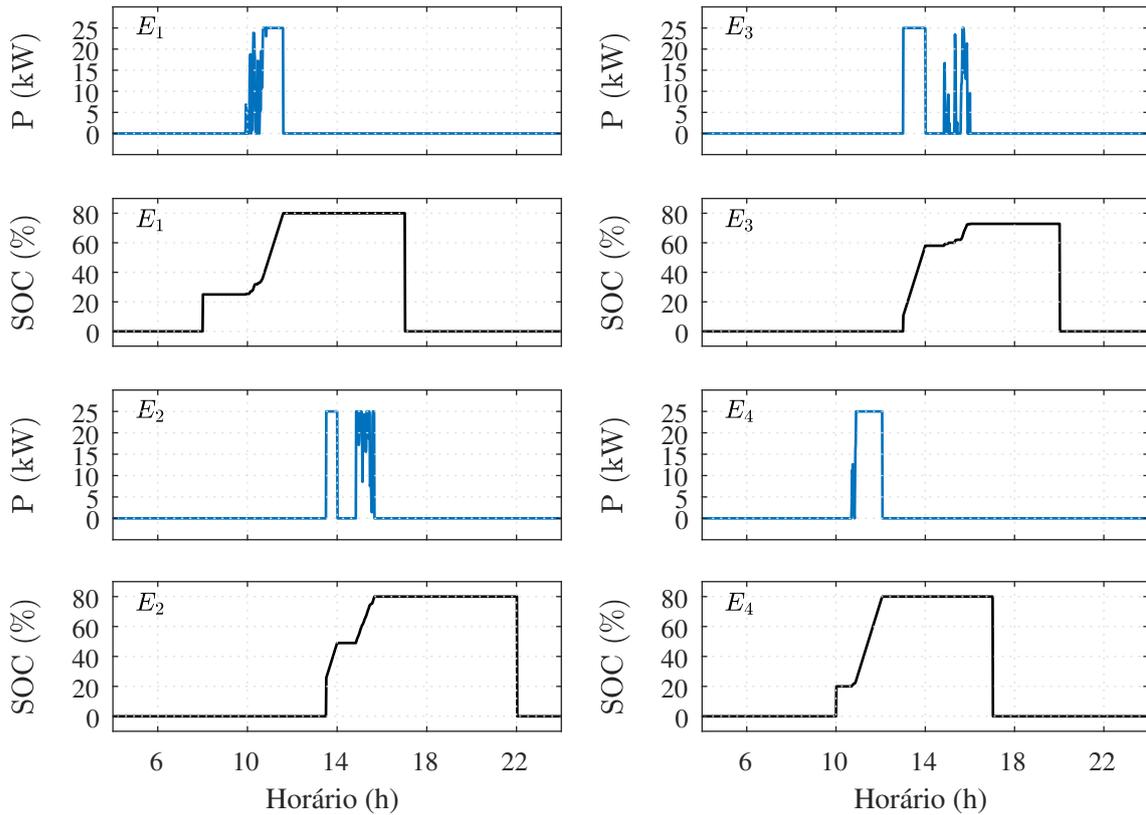
carregamento do BESS  $P_{bess}^+$  é igual à potência nominal definida até que o carregamento seja concluído. Durante o evento de ultrapassagem de demanda devido principalmente ao carregamento dos EVs, o BESS fornece suporte à microrrede a partir do instante em que os EVs no modo V2G atingem a restrição de descarga definida por  $SOC_{EV_{v2g}} < 40\%$ . A operação de descarregamento do BESS é indicada tanto pela potência negativa  $P_{bess}^-$  quanto pela diminuição do seu SOC. Portanto, verificou-se que o BESS pode aproveitar o armazenamento do excedente de energia de geração PV e tornar a microrrede mais confiável e robusta no fornecimento de energia, sem a necessidade de comprá-la da rede principal.



**Figura 20 – Potência de operação e SOC do BESS na microrrede.**

As potências e SOC dos EVs durante o carregamento com o modo ECO são apresentadas na Figura 21. Praticamente todos os EVs em algum intervalo de carregamento apresentam alguma variação na potência de carregamento, o que afeta o comportamento do SOC e do tempo de carregamento. Essa condição é causada por um nível de potência excedente de PV menor do que o necessário para carregar os EVs de forma econômica ou pela conexão de EVs nos modos ULTRA e FAST com prioridade de carregamento mais alta. Portanto, os EVs no modo ECO carregam na Região B, a qual é apresentada na Figura 4 e descrita na Seção 3.3.

Na Figura 22 são mostradas as potências e os SOC dos EVs durante o carregamento no modo V2G. Nota-se que durante a ocorrência de excedente de geração PV, em que o custo de carregamento é menor, os EVs em V2G carregam. Os EVs 1 e 4 nesse modo, representados por  $V2G_1$  e  $V2G_4$ , alcançam o SOC máximo definido como 80%. No entanto, os EVs 2 e 3, representados por  $V2G_2$  e  $V2G_3$ , não atingem o SOC máximo, sendo carregados até um nível de SOC de 50%. Portanto, durante a operação de suporte à



**Figura 21 – Potências e SOC's do EVs conectados no modo ECO.**

microrrede, os EVs V2G 1 e 4 fornecem mais energia até atingirem o  $SOC_{min}$ , definido como 40% para esse modo, em comparação com os EVs 2 e 3. Portanto, os EVs no modo V2G operam nas Regiões B, C e D, conforme ilustrado na Figura 4 e detalhado na Seção 3.3.

A estratégia de gerenciamento do carregamento de EVs contempla diferentes potências, como pode ser observado na Figura 23. A estratégia segue uma prioridade para os modos de carregamento, com os modos ECO e V2G sendo aplicados durante o excedente de geração PV. Isso resulta em custos de carregamento mais baixos para os usuários EV nesse modos e maior lucro para o proprietário do estacionamento. Na Figura 23, ainda é possível observar o efeito do carregamento prioritário, o qual é mais evidente entre os horários 14h e 14:50h, quando há uma demanda por carregamento ULTRA e FAST, o que leva à necessidade de comprar energia da rede. Nesse período, o EMS envia comandos para interromper o carregamento dos EVs nos modos ECO e V2G, assim como definido pelas premissas impostas para a operação de carregamento desses modos específicos.

Com o intuito de complementar os resultados e análises apresentados anteriormente, a Figura 24 apresenta uma visão expandida e integrada do impacto do carregamento dos

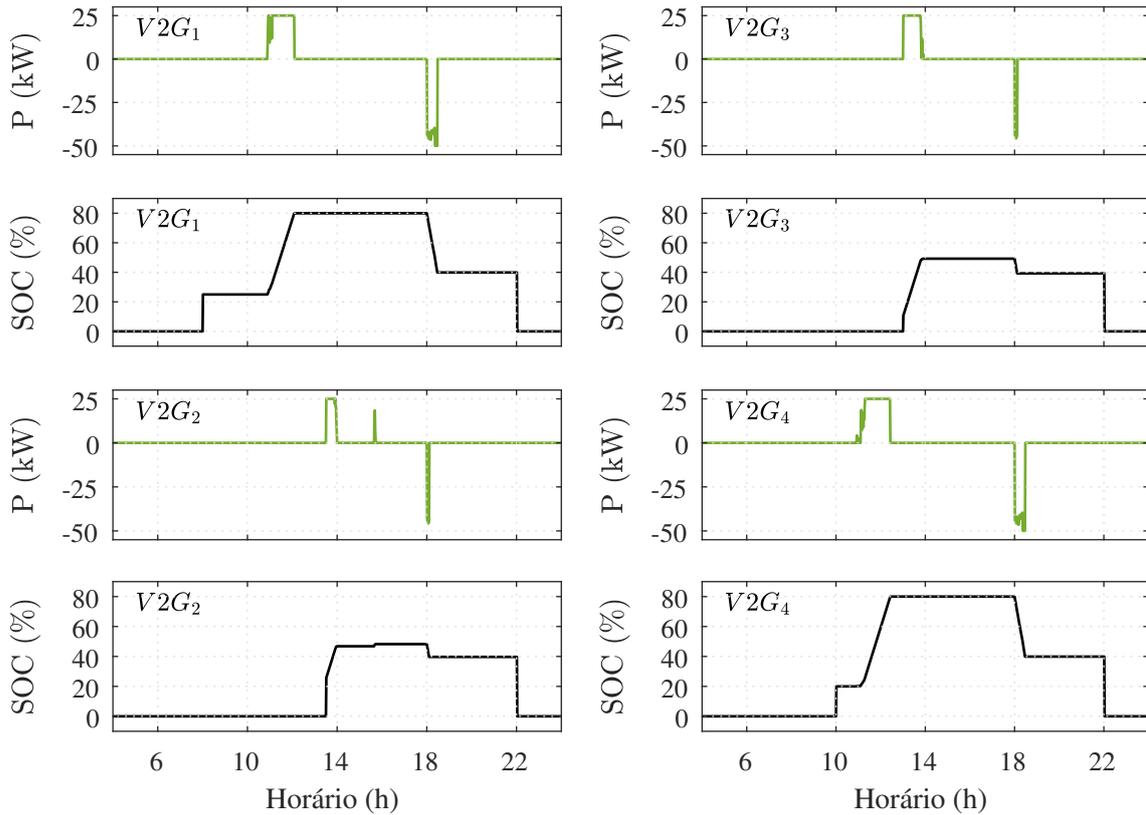


Figura 22 – Potências e SOC dos EVs conectados no modo V2G.

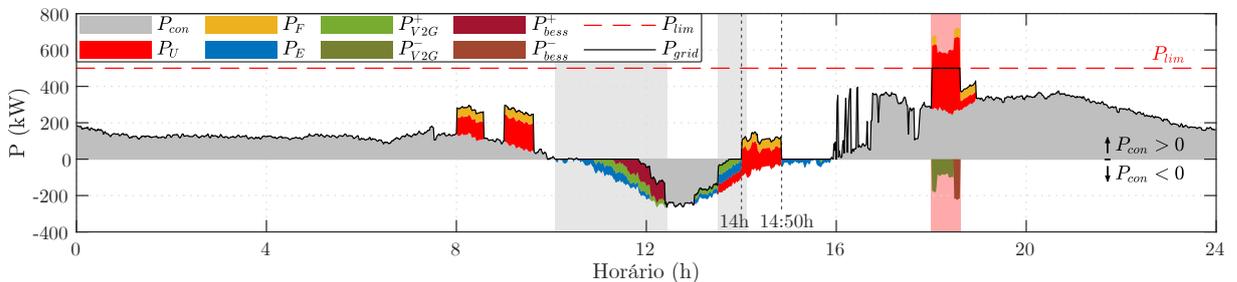


Figura 23 – Potências dos modos de carregamento EV e potências resultantes no ponto de conexão comum.

EVs de cada modo de carregamento no fluxo de potência da microrrede. Na Figura 24(a) são ilustradas as potências totais de cada modo de carregamento EV e também a potência total de carregamento destinada à todos os EVs conectados no estacionamento, a qual é representada pela variável  $P_{EVSE_t}$ . É visivelmente claro uma demanda maior de energia para o carregamento do modo ULTRA. No período de excedente de geração PV, representado pela área hachurada verde na figura e quando  $P_{con} < 0$ , verifica-se o carregamento dos modos ECO e V2G além dos modos ULTRA e FAST.

As potências resultantes no ponto de conexão comum dos elementos da microrrede são mostradas na Figura 24(b). A potência  $P_{con}$  se refere às potências resultantes do ponto

de conexão das cargas e geração PV, enquanto a potência  $P_{grid}$  representa a potência vista pela rede elétrica externa. Na Figura 24(b), além do início do carregamento dos EVs nos modos ECO e V2G, verifica-se também a potência de carregamento do BESS ( $P_{bess}^+$ ) durante o excedente de geração PV e a tarifa de energia no horário fora de ponta.

Durante o período de limitação de potência representado pela área hachurada vermelha nas Figuras 24(a) e (b), verifica-se praticamente apenas o carregamento dos EVs em modo ULTRA, com pequena participação do modo FAST. Isso indica que o gerenciamento está respeitando as premissas de prioridade assumidas para o carregamento dos EVs conectados no estacionamento da microrrede. Além disso, o modo V2G e o BESS estão fornecendo energia para suprir a potência limitada, os quais possuem suas potências representadas por  $P_{V2G}^-$  e  $P_{bess}^-$  respectivamente.

Complementando a análise, a Figura 24(c) ilustra as potências de carregamento dos EVs conectados nos modos ULTRA (U), FAST (F), ECO (E) e V2G. As áreas hachuradas indica o período que os EVs permanecem conectados nas estações de carregamento, ainda as variáveis  $t_i$  e  $t_f$  indicam o horário de chegada e partida dos EVs. Então, observa-se que os EVs nos modos ULTRA e FAST começam a carregar imediatamente após conectarem à estação de recarga, ao contrário dos EVs em modo ECO ou V2G que só iniciam o carregamento caso a premissa de excedente de geração PV ser verdadeira. Além disso, durante o período de limitação de potência, é possível notar que um dos EVs no modo FAST tem sua potência de carregamento anulada durante algum período devido a ultrapassagem de demanda contratada da microrrede e o modo V2G em seu limite de fornecimento de energia. Os SOCs dos EVs nos modos ULTRA e FAST são mostrados na Figura 25. Verifica-se que mesmo alguns EVs nesses modos tendo os índices de limitação de potência aplicados quando há ultrapassagem da demanda contratada, todos EVs ULTRA e FAST são carregados completamente até o horário de partida.

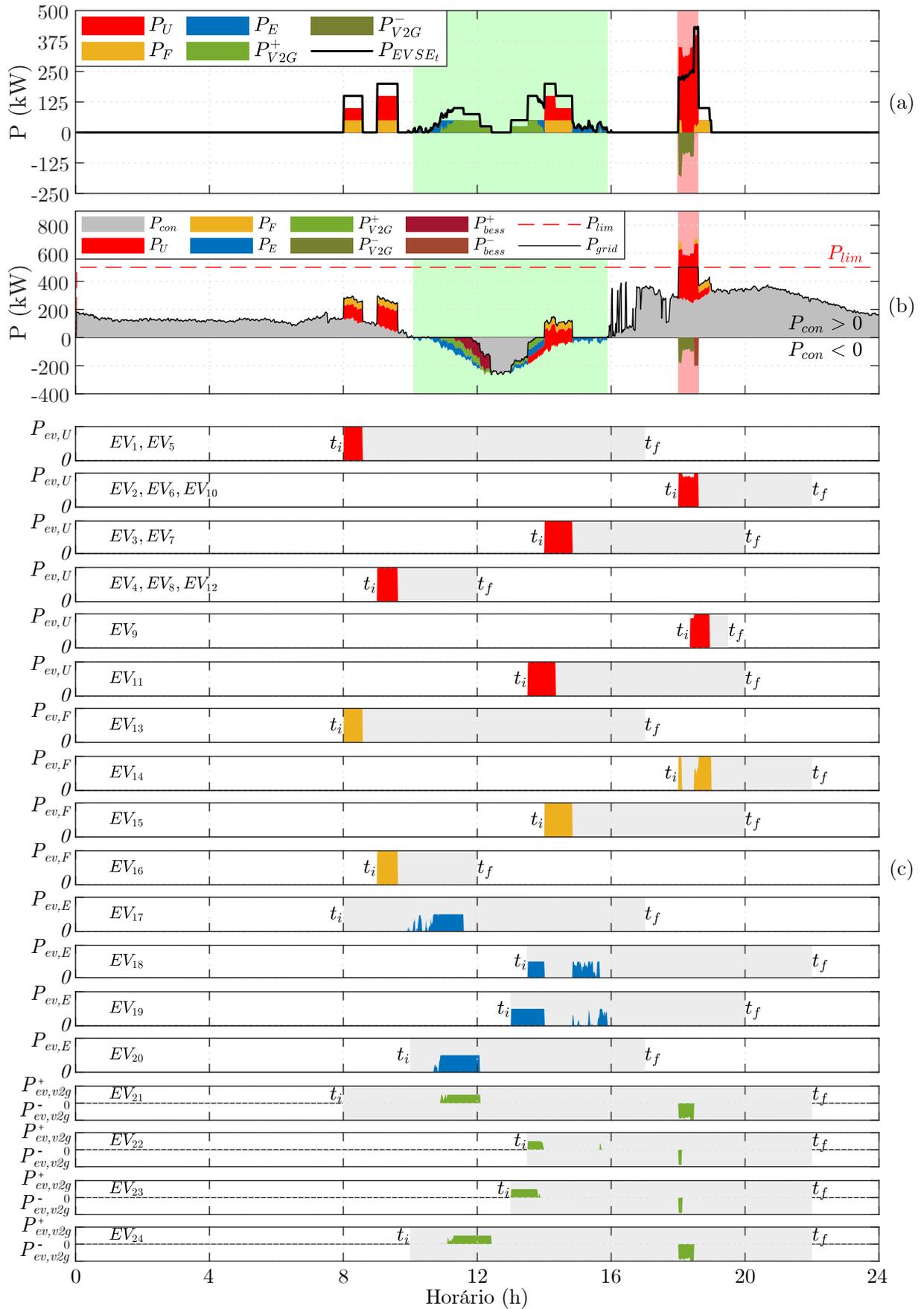


Figura 24 – Potências na microrrede: (a) Potências dos modos de carregamento EV. (b) Potências resultantes no ponto de conexão comum dos elementos da microrrede. (c) Potências de carregamento dos EVs.

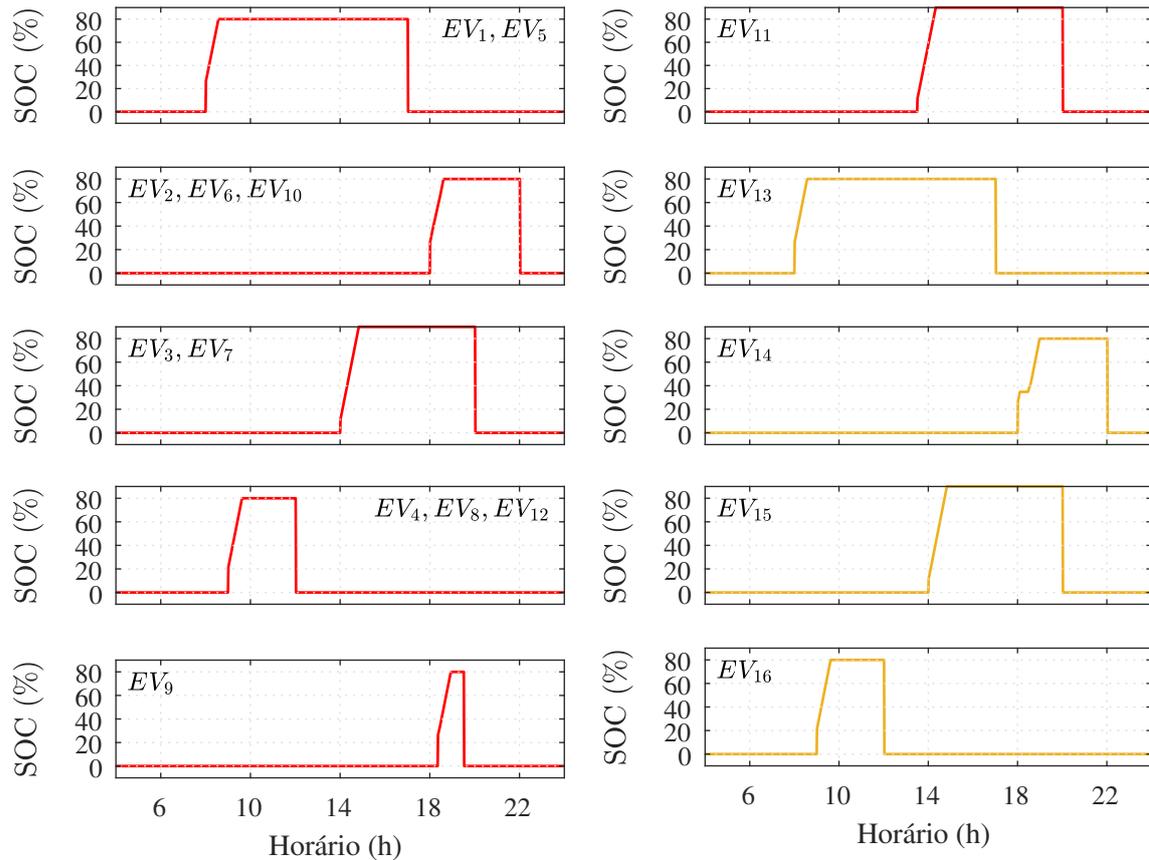


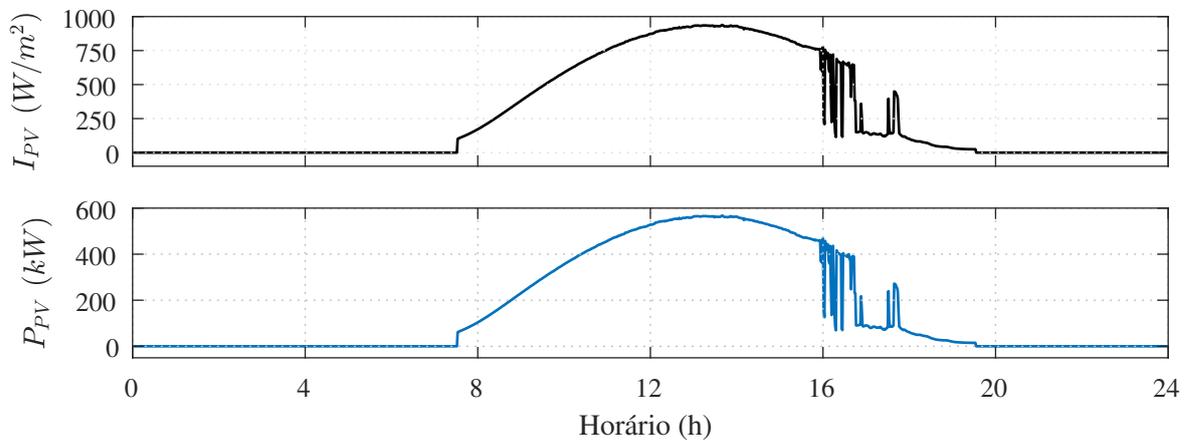
Figura 25 – SOC dos EVs nos modos ULTRA (vermelho) e FAST (amarelo).

#### 4.3 SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE GERENCIAMENTO COM LÓGICA FUZZY

Para fins de comprovação do funcionamento do sistema de gerenciamento com lógica fuzzy proposto para determinar as potências de carregamento dos EVs conectados às estações de recarga presente na microrrede, simulou-se três cenários de geração PV, visto que essa é uma das principais bases das premissas adotadas. O primeiro cenário representa um dia com ensolarado e com poucas nuvens, em que a geração PV sofre pouca intermitência e consegue gerar energia em sua capacidade nominal. Já o segundo cenário tem o intuito de mostrar o que aconteceria em dias nublados ou chuvosos, nos quais a geração PV é baixa e não há excedente de energia. Por fim, o último cenário consiste em representar dias em que a intermitência de geração é alta devido a variação de nuvens que ocasionam sombreamentos nos arranjos de painéis fotovoltaicos. Os resultados obtidos na simulação do sistema estão divididos em três partes, uma para cada cenário analisado.

### 4.3.1 Resultados de Simulação para o Cenário 1

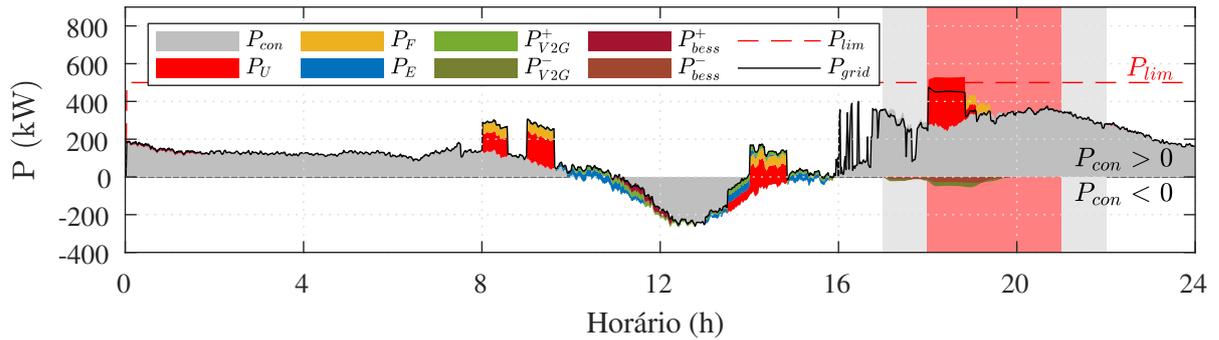
O cenário 1, apresentado pela Figura 26, representa os dias com melhor irradiação solar incidindo sobre o arranjo de módulos fotovoltaicos, ocasionando uma geração de energia praticamente sem intermitências ao longo do dia. Nesse cenário, analisou-se o carregamento dos EVs e do BESS para o caso com excedente de geração PV suficiente para carregar os EVs e ainda vender energia para a rede elétrica. Constatou-se que nesse cenário a potência de carregamento fornecida tende a se manter constante, sem muitas variações, e sem a necessidade de interrompimento no fornecimento durante a ocorrência do excedente de geração na microrrede.



**Figura 26 – Irradiância solar incidente sobre o arranjo de painéis solares e geração PV no cenário 1.**

A estratégia de gerenciamento do carregamento de EVs utilizando lógica fuzzy contempla diferentes potências assim como o gerenciamento baseado em regras apresentado anteriormente na Seção 4.2. O carregamento dos EVs continua seguindo a prioridade dos modos estabelecidas pelas premissas adotadas, carregando os EVs ECO e V2G durante os horários de menor demanda de energia e quando há excedente de geração PV, como é mostrado na Figura 27. O carregamento prioritário dos EVs pode ser percebido principalmente entre o intervalo de tempo de 14h a 14:50h, no qual há uma demanda de carregamento ULTRA e FAST consumindo o excedente de geração PV. Nesse momento, as potências de carregamento ECO e V2G são reduzidas uma vez detectada essa nova demanda. Nota-se que após o fornecimento das potências das potências  $P_U$  e  $P_F$  serem nulas, a potência  $P_E$  volta a aumentar após detectar uma baixa demanda de energia.

Analisando ainda a Figura 27, verifica-se que a partir do horário 17h quando inicia-se a cobrança da tarifa intermediária de energia, o modo V2G e o BESS começam



**Figura 27 – Potências dos modos de carregamento EV e potências resultantes no ponto de conexão comum no cenário 1.**

a descarregar, aliviando parcela da energia comprada da rede elétrica externa comprada pela microrrede. A partir do das 18h entra em vigor a tarifa de ponta e ainda a demanda de energia da microrrede é aumentada acima do limite de potência contratada  $P_{lim}$ . Nesse momento, os EVs V2G e o BESS aumentam o nível de potência fornecido à microrrede evitando a ultrapassagem de  $P_{lim}$  e ,consequentemente, evita-se multa por ultrapassagem da demanda contratada.

As potências de carregamento dos EVs conectados aos modos ULTRA, FAST, ECO e V2G utilizando os controladores de lógica fuzzy no gerenciamento são mostradas na Figura 28. Constata-se um carregamento mais suave dos EVs ECO e V2G, os quais carregam durante os períodos de menor demanda de energia e, preferencialmente, durante o período com excedente de geração PV como visto na Figura 27. Pela Figura 28 também é possível verificar a redução da potência de carregamento do modo ECO entre 14h e 14:50h devido a conexão de EVs nos modos ULTRA e FAST, os quais possuem prioridade superior ao ECO. Além disso, constata-se o fornecimento da energia pelos EVs V2G com a mudança de tarifa de energia e aumento da demanda de energia da microrrede.

A operação do BESS no cenário 1 utilizando lógica fuzzy é mostrada na Figura 29, onde são apresentadas as potências de carregamento  $P_{bess}^+$  e descarregamento  $P_{bess}^-$ , assim como o seu SOC resultante. Inicialmente, como o SOC do BESS é muito próximo ao seu SOC mínimo definido como 15%, esse recebe um certo nível de potência visto a baixa demanda da microrrede até atingir 40%, e então a sua taxa de carregamento é diminuída até o momento em que ocorre excedente de geração PV. Com a ocorrência de  $P_{con} < 0$ , o BESS carrega com um nível de potência maior, respeitando a prioridade de carregamento dos EVs, até atingir seu SOC máximo definido como 85%. A partir do horário em que a tarifa de energia muda de fora de ponta para intermediária, o BESS começa a descarregar

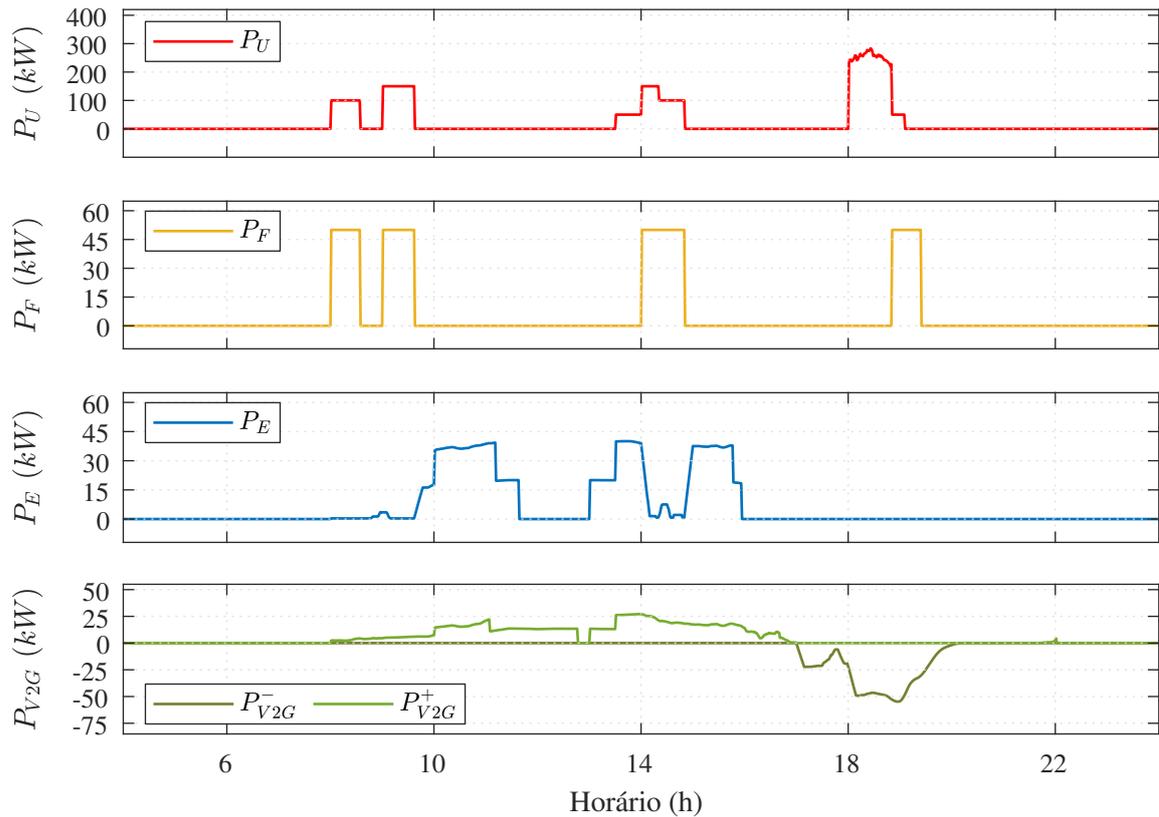


Figura 28 – Potências dos modos de carregamento dos EVs conectados à microrrede no cenário 1.

e eleva a potência de descarga a partir das 18h, em que a tarifa de energia é a mais cara e a demanda de energia na microrrede aumenta consideravelmente. Além disso, verifica-se que conforme  $SOC_{bess}$  vai se aproximando do seu valor mínimo, a potência de descarga começa de diminuir.

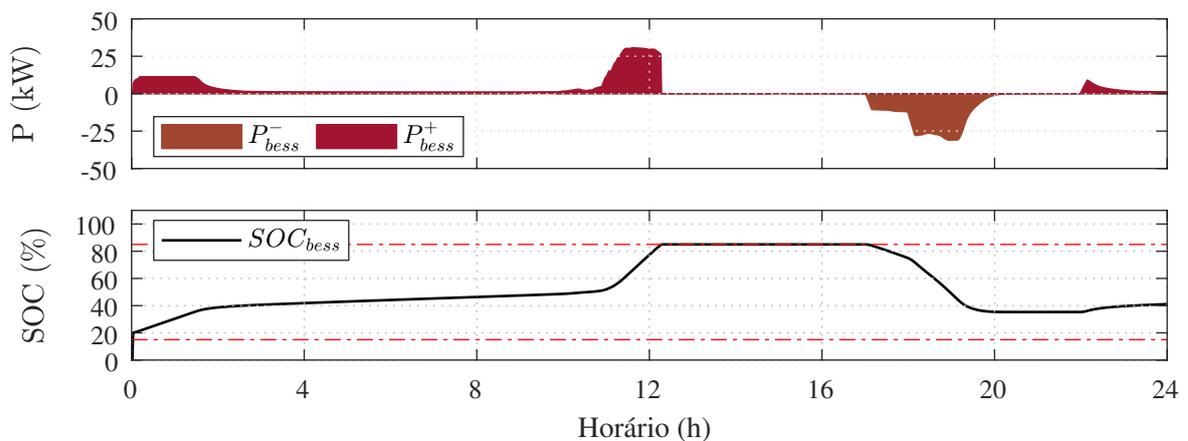
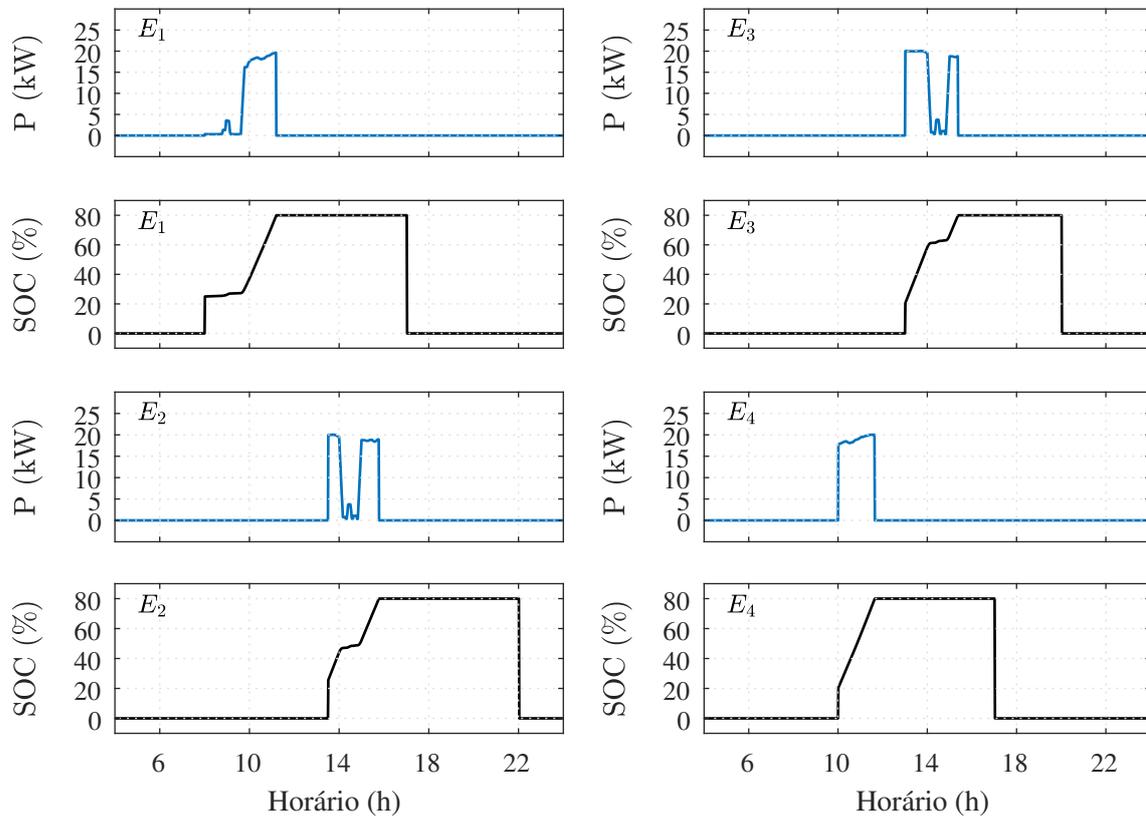


Figura 29 – Potência de operação e SOC do BESS na microrrede no cenário 1.

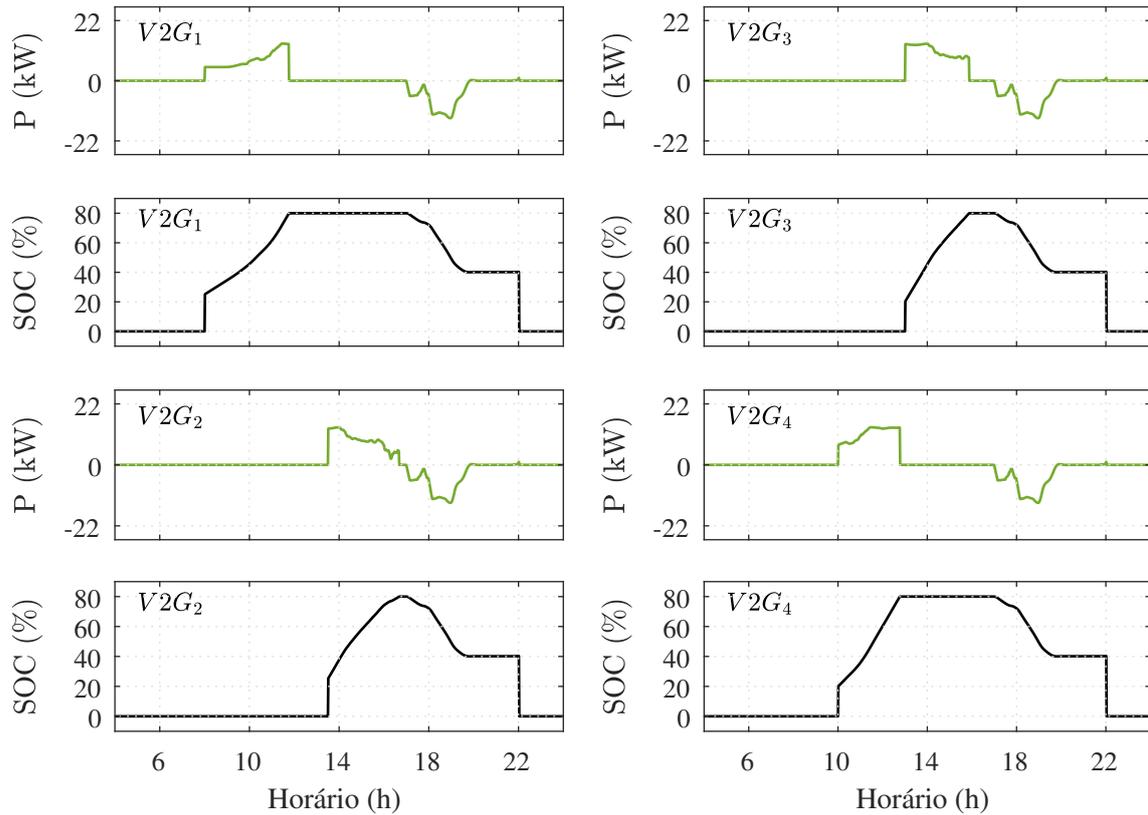
As potências e SOC dos EVs durante o carregamento no modo ECO utilizando a lógica fuzzy no cenário 1 são apresentadas na Figura 30. As variações na potência de

carregamento desses EVs apresentadas nos resultados para o gerenciador baseado em regras não ocorrer utilizando o novo gerenciador, obtendo-se potências de carregamento mais constantes e suaves. Além disso, todos os EVs ECO são carregados completamente, aproveitando-se da baixa demanda de energia e excedente de geração PV na microrrede.



**Figura 30 – Potências e SOC's do EVs conectados no modo ECO no cenário 1.**

Para as potências e SOC's dos EVs no modo V2G também são verificadas mudanças com a abordagem do gerenciador utilizando lógica fuzzy, como mostrado na Figura 31. Nos EVs V2G 2 e 3, são apresentadas potências de carregamento inicialmente mais elevadas, fato que ocorre devido ao FLC2 aplicado ao modo perceber que o SOC desses EVs está abaixo de 40% e ocorre excedente de geração PV. Todos EVs V2G atingem o SOC máximo definido como 80% nessa abordagem, tirando proveito do excedente de geração PV. Portanto, durante a operação de suporte à microrrede, os EVs V2G apresentam potências de descarregamento iguais, com um nível mais elevado quando a tarifa é de ponta e há alta demanda de energia na microrrede. Verifica-se que esses EVs descarregam até atingirem o SOC de 40%, conforme estabelecido nas premissas de operação do modo V2G.



**Figura 31 – Potências e SOC dos EVs conectados no modo V2G no cenário 1.**

#### 4.3.2 Resultados de Simulação para o Cenário 2

No cenário 2, mostrado na Figura 32, são representados os dias nublados e chuvosos nos quais a incidência de irradiação solar é menor, resultando em uma geração PV baixa e sem ocorrência de excedente de geração PV nesse trabalho. Nesse cenário analisa-se como o gerenciador utilizando lógica fuzzy se comporta e quais potências resultantes para os modos de carregamento EV e operação do BESS. Para esse cenário, verificou-se que há dificuldades em carregar completamente todos os EVs conectados, principalmente os modos de menor prioridade. Entretanto, mesmo nesse cenário foi possível atender as premissas de operação propostas para os modos de carregamento EV.

As potências de carregamento dos diferentes modos EV e potências resultantes no ponto de conexão comum durante o cenário 2 são apresentadas na Figura 33. Nesse cenário o carregamento dos EVs ULTRA e FAST carregam normalmente, não sendo afetados pela falta de excedente de geração PV, caracterizada por  $P_{con} > 0$ . Os EVs ECO e V2G carregam durante a demanda de energia mais baixa na microrrede, que ocorre aproximadamente entre 12h e 14h, até o momento em que o modo ULTRA e FAST

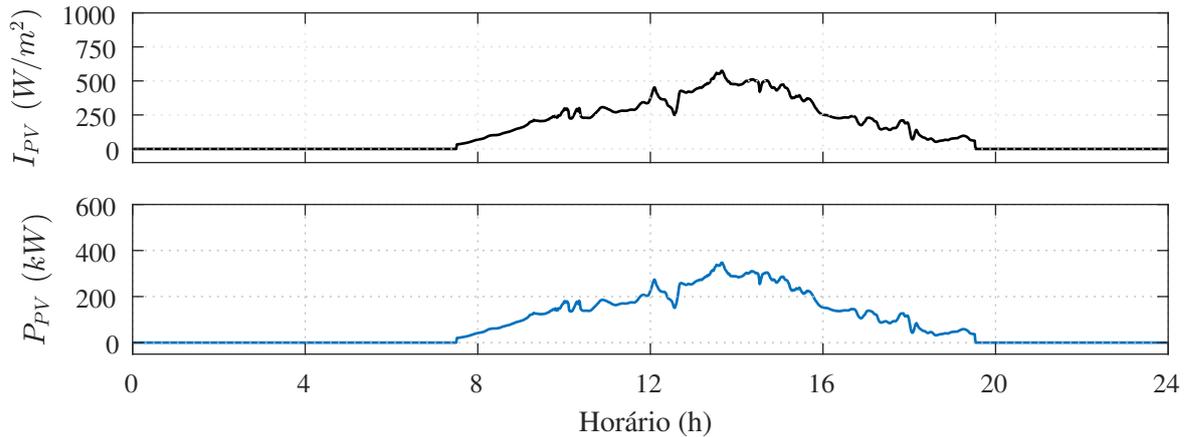


Figura 32 – Irradiância solar incidente sobre o arranjo de painéis solares e geração PV no cenário 2.

demandam potência de carga. Além disso, verifica-se que o carregamento dos EVs segue a ordem de prioridade adotada no gerenciamento das estações de carregamento.

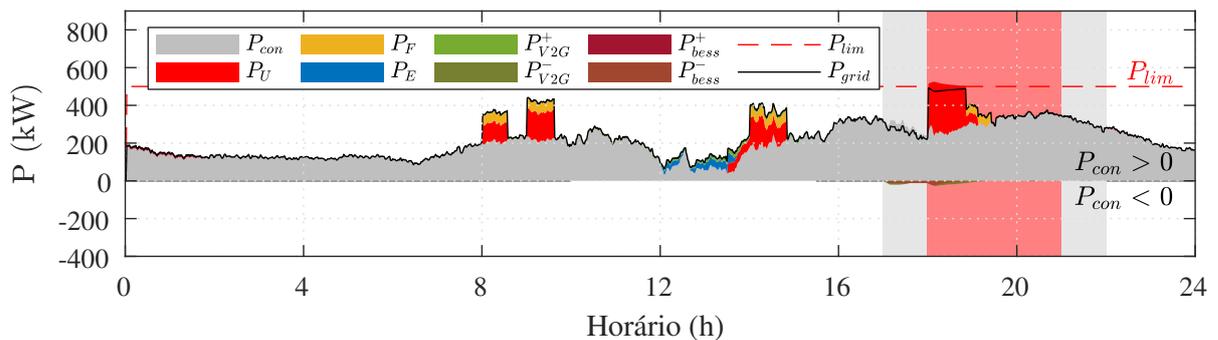


Figura 33 – Potências dos modos de carregamento EV e potências resultantes no ponto de conexão comum no cenário 2.

Em relação às potências dos modos de carregamento dos EVs conectados à microrrede no cenário 2, observa-se diferenças significativas nos perfis e níveis de potência de carregamento do modo ECO e V2G quando comparados aos apresentados no cenário 1. Na Figura 34 essas diferenças podem ser verificadas, em que a energia fornecida para esses EVs não é suficiente para carregá-los completamente. Além disso, durante o suporte à microrrede o modo V2G não possui sua capacidade máxima assim como apresentada no cenário 1, pois para o cenário 2 os EVs não alcançaram o SOC máximo e assim chegam ao SOC mínimo mais rápido.

Para esse cenário o BESS também não atinge o seu SOC máximo como anteriormente no cenário 1. Nesse caso é carregado lentamente até o momento em que seu suporte é requisitado pela microrrede, como pode ser visto na Figura 35. A partir do momento em que a tarifa de energia retorna para o horário fora de ponta, o BESS volta ser carregado

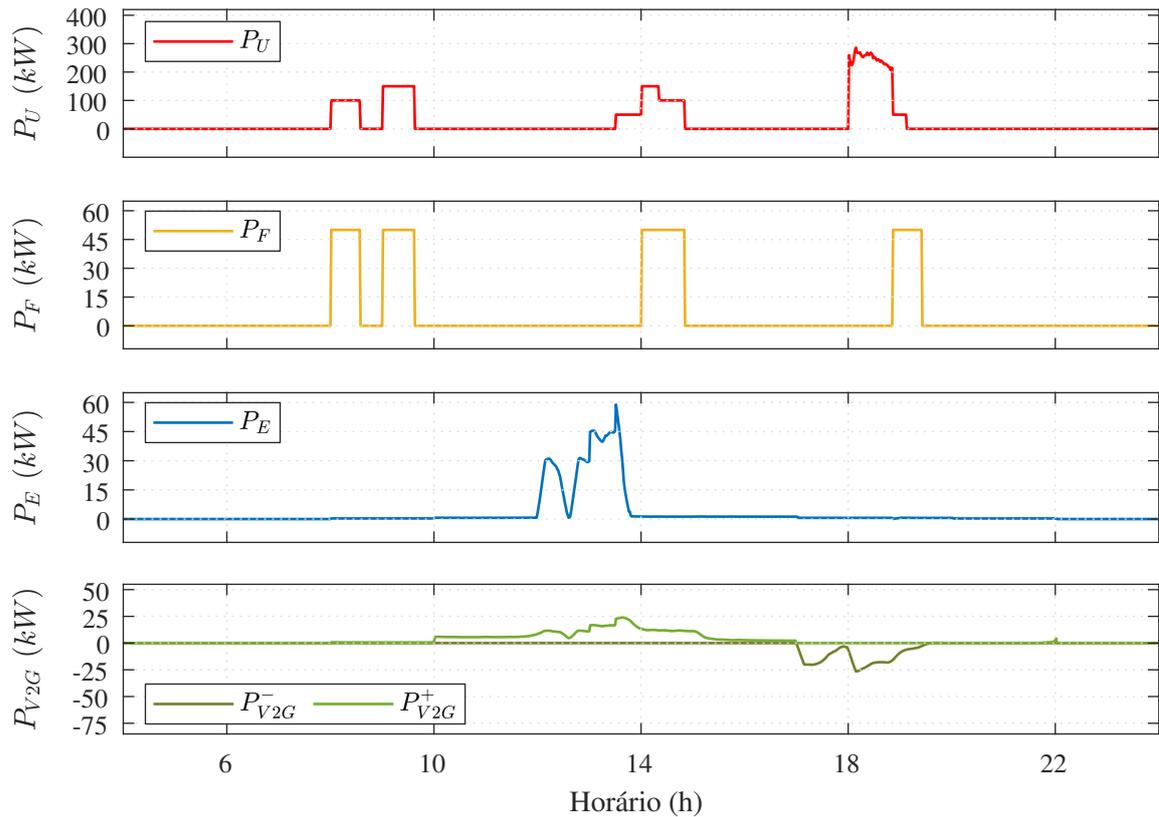


Figura 34 – Potências dos modos de carregamento dos EVs conectados à microrrede no cenário 2.

lentamente conforme o comando de potência definido pelo gerenciador baseado em lógica fuzzy.

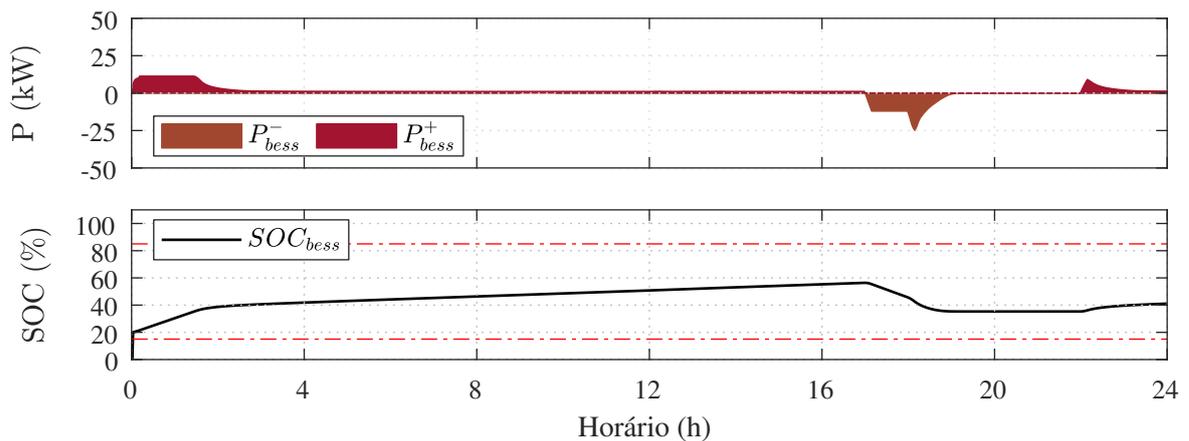
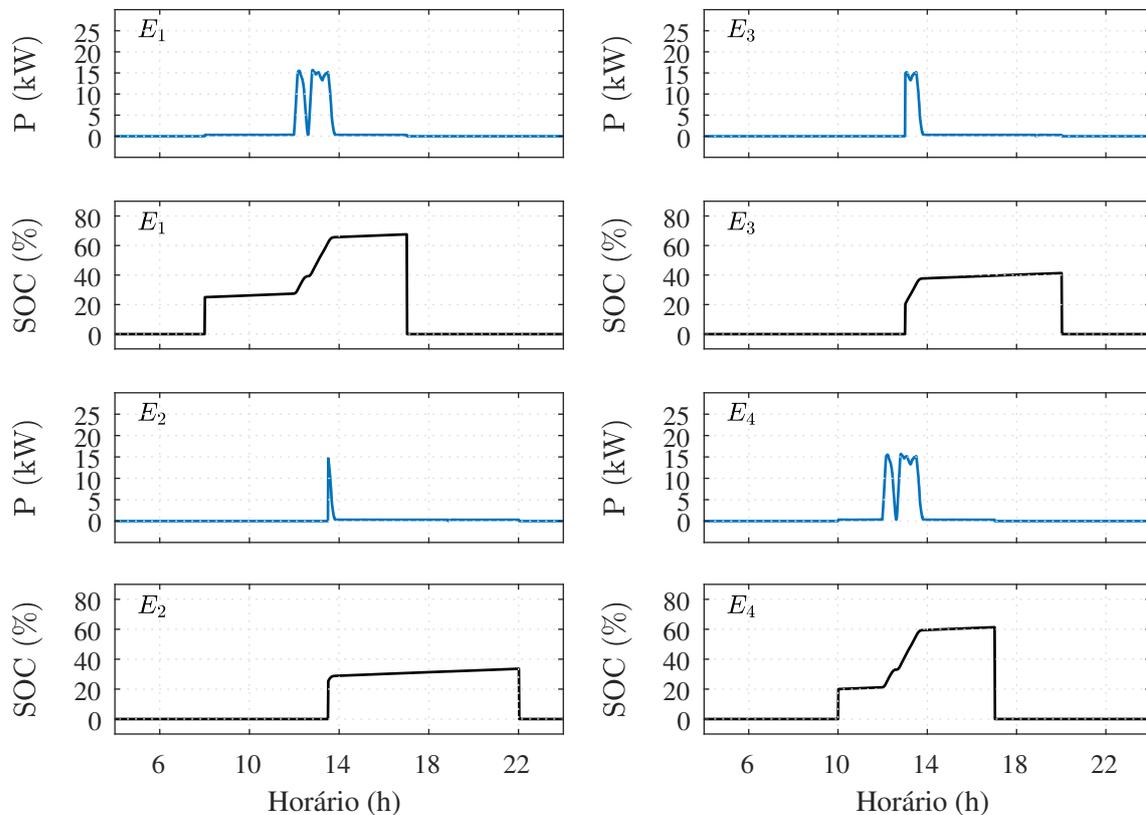


Figura 35 – Potência de operação e SOC do BESS na microrrede no cenário 2.

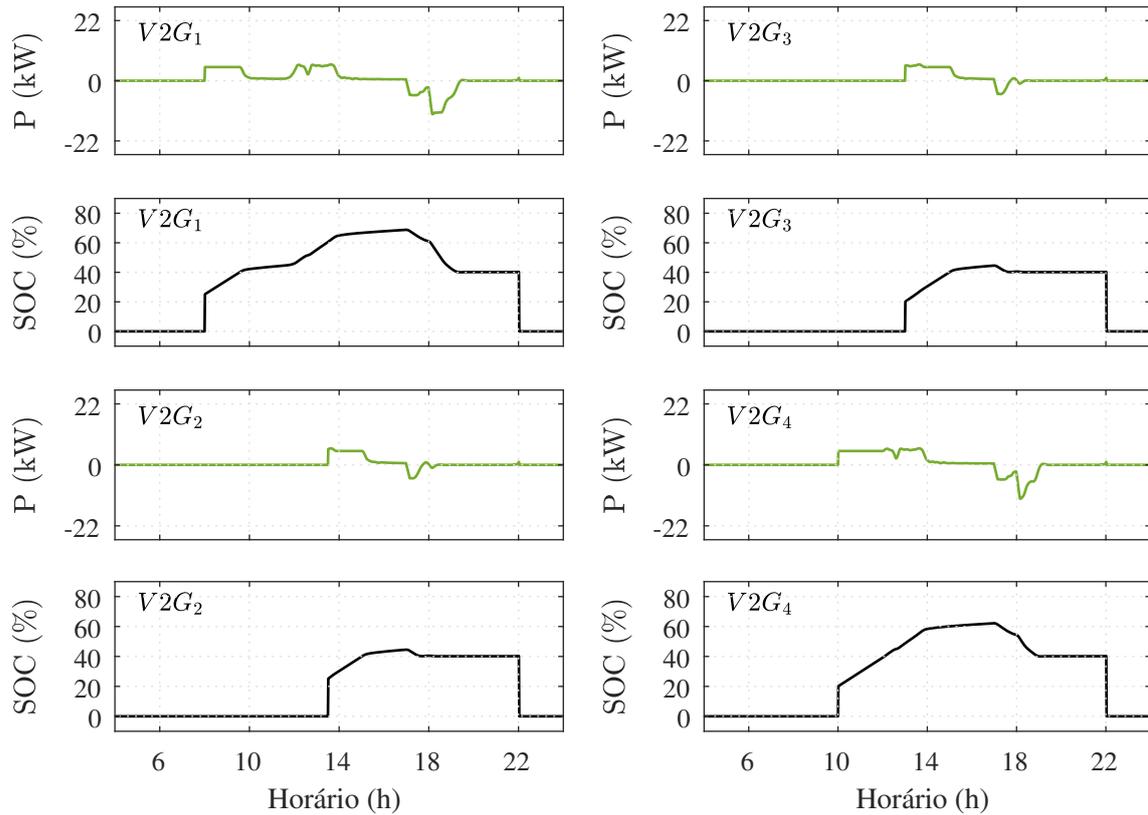
As potências e SOC dos EVs conectados no modo ECO e resultantes do cenário 2 são apresentadas na Figura 36. Verifica-se que a potência de carregamento ao longo do tempo é reduzida e nenhum EV carrega completamente, o que obedece a premissa de que não há garantia de carregamento total nesse modo. Essa premissa é mais evidente nos

EVs 2 e 3 desse modo, os quais carregam minimamente, desconectando da estação de carregamento com uma pequena variação no SOC em relação ao seu SOC inicial.



**Figura 36 – Potências e SOC's do EVs conectados no modo ECO no cenário 2.**

No modo V2G os EVs conectados nas estações de recarga durante um maior período de tempo carregam atingindo SOC's de aproximadamente 70% e 60%, como é o caso dos EVs 1 e 4 vistos na Figura 37. Já os EVs V2G 2 e 3 carregam até praticamente atingirem um SOC um pouco maior de 40%. Portanto, esses valores de SOC interferem diretamente na quantidade de potência fornecida pelo modo V2G durante a operação de suporte à microrrede, pois a capacidade de fornecimento do modo torna-se reduzida. Entretanto, tal fato pode ocorrer e é aceito pelas premissas impostas ao modo V2G, em que o carregamento dos EVs do modo está relacionada a quantidade de potência excedente da geração PV.



**Figura 37 – Potências e SOC dos EVs conectados no modo V2G no cenário 2.**

#### 4.3.3 Resultados de Simulação para o Cenário 3

O último cenário a ser analisado traz imprevisibilidade ao fornecimento de energia para microrrede, pois se trata dos casos com alta intermitência na geração proveniente de energia solar. Esse cenário é apresentado na Figura 38, onde é possível verificar altos e baixos na geração de energia fotovoltaica. O cenário 3 apresenta grandes variações na potência gerada pelo arranjo PV, o que afeta diretamente o funcionamento do gerenciador proposto, uma vez que há premissas baseadas no excedente de geração PV. Portanto, pra que essas variações não causassem altas flutuações em curtos períodos de tempo na potência de carregamento dos EVs, utilizou-se um sistema de média móvel para filtrar a potência média a ser fornecida para carregar os EVs nos modos ECO e V2G e o BESS juntamente com o sistema de inferência fuzzy.

Na Figura 39 são mostradas as potências dos modos de carregamento EV e potências resultantes no ponto de conexão comum no cenário 3. Devido ao perfil de geração PV apresentado nesse cenário há vários períodos de tempo em que a potência na microrrede varia entre valores positivos e negativos. Observa-se que isso ocasiona o carregamento

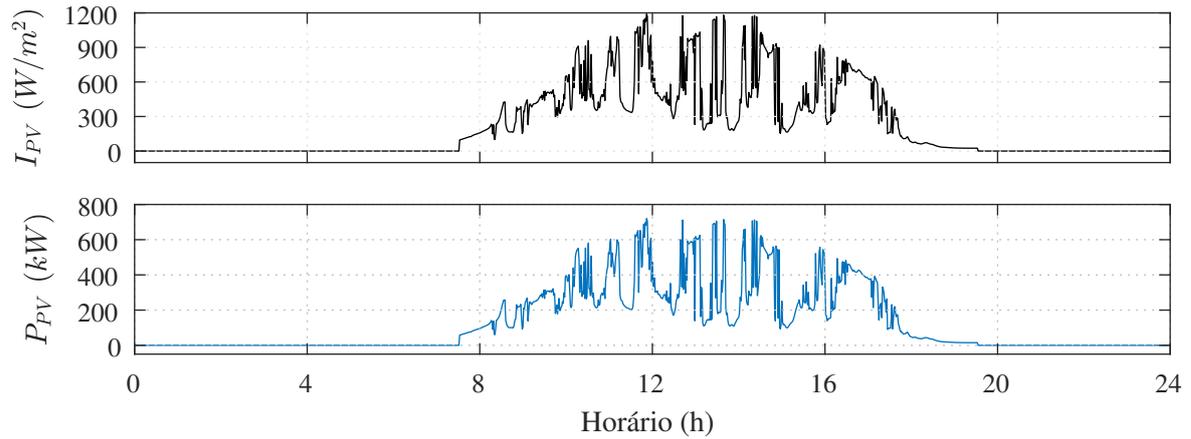


Figura 38 – Irradiância solar incidente sobre o arranjo de painéis solares e geração PV no cenário 3.

dos EVs ECO e V2G em diferentes horários do dia, porém obedecendo as premissas dos respectivos modos e regras estabelecidas para o gerenciamento com lógica fuzzy. O mesmo ocorre para a operação de carregamento do BESS, que é carregado com maior potência em momentos distintos do dia. Durante a operação de suporte à microrrede do V2G e do BESS, verifica-se que o cenário 3 não trouxe mudanças significativas em relação ao cenário 1 analisado anteriormente.

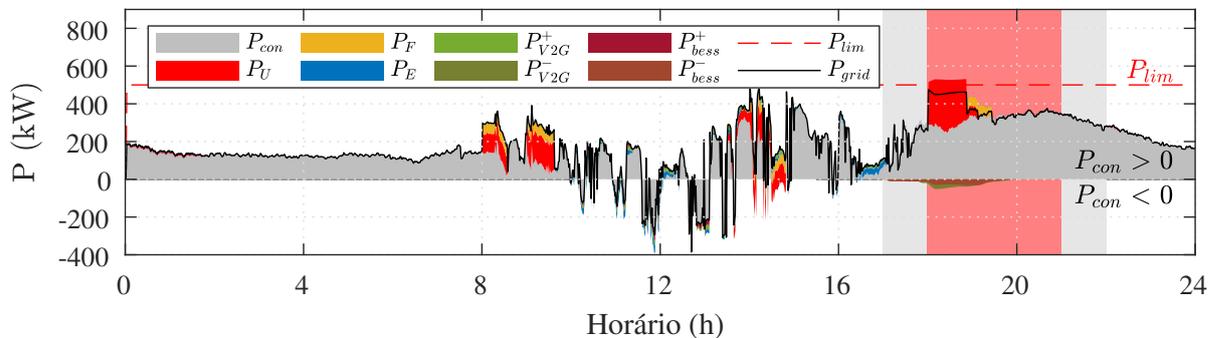
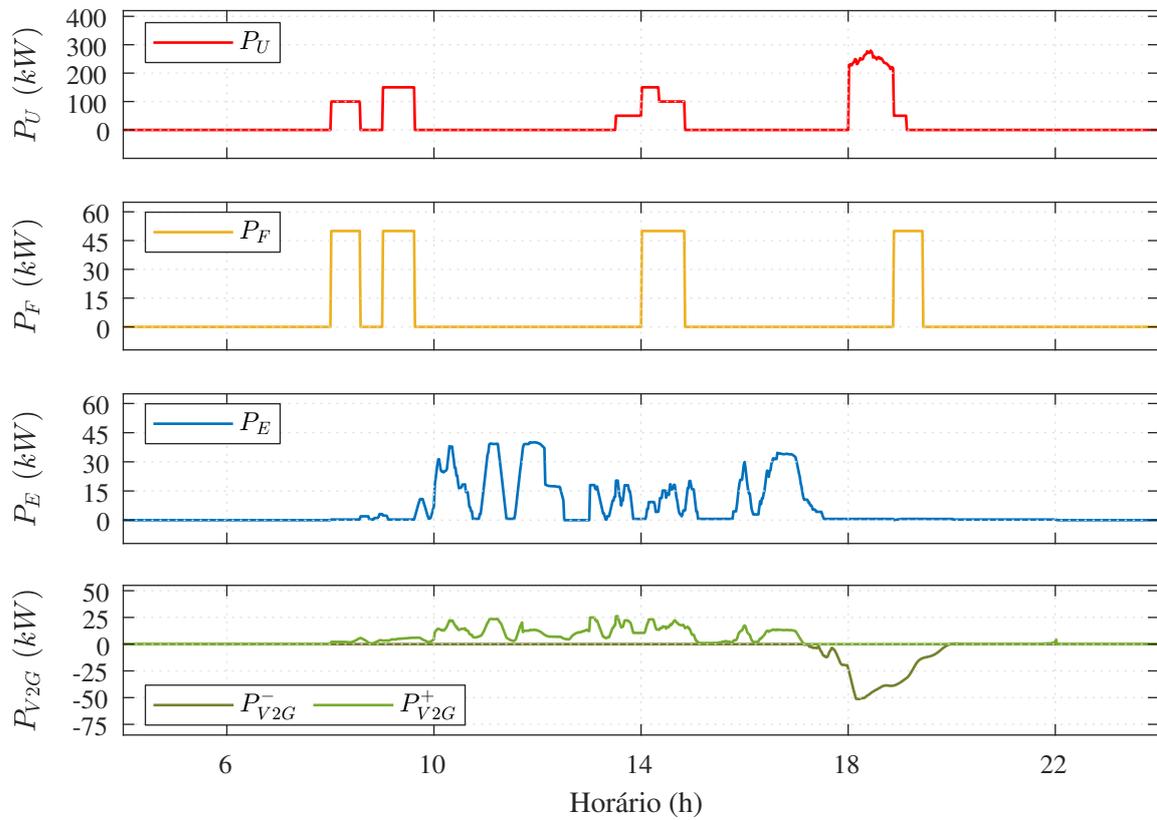


Figura 39 – Potências dos modos de carregamento EV e potências resultantes no ponto de conexão comum no cenário 3.

As potências resultantes para os modos de carregamento dos EVs conectados à microrrede no cenário 3 são mostradas na Figura 40. Novamente, verifica-se que os modos ULTRA e FAST não são afetados pela geração PV, carregando normalmente os EVs dos respectivos modos. Entretanto, para os modos ECO e V2G é possível visualizar perfis de potência completamente diferentes dos mostrados nos cenários anteriores. A alta intermitência na geração PV afeta os perfis de carregamento dos EVs ECO e V2G, assim como o BESS, devido estarem relacionados à condição  $P_{con} < 0$  que caracteriza excedente de geração PV. Entretanto, mesmo com esse cenário foi possível atingir SOC's significativos

durante o carregamento dos EVs desses modos e a carga completa do BESS.



**Figura 40 – Potências dos modos de carregamento dos EVs conectados à microrrede no cenário 3.**

No cenário 3, assim como nos cenários 1 e 2, o BESS carrega inicialmente até atingir um SOC de 40% e a partir desse valor têm sua potência de carregamento reduzida até o gerenciador identificar os momentos oportunos para elevar  $P_{bess}^+$ , como visto na Figura 41. Observa-se que o BESS carrega em quatro intervalos de tempo distintos, porém possui seu SOC máximo atingido sem problemas. Durante a operação de descarga do BESS,  $P_{bess}^-$  inicia em um valor baixo e vai se elevando à uma potência maior para dar suporte à microrrede, fornecendo potência para atender a demanda de carregamento dos EVs ULTRA e FAST conectados nesse período, sem ultrapassar a demanda de energia contratada  $P_{lim}$ .

Para o cenário 3 as potências dos EVs no modo ECO apresentam variações devido a alta intermitência na geração PV, como pode ser visto na Figura 42 que mostra os EVs conectados ao modo. Ainda, também são apresentados os SOCs desses EVs, que para o cenário 3 alcançam um SOC alto após o carregamento, com os EVs ECO 1 e 4 atingindo o SOC máximo escolhido. Os EVs 2 e 3 não chegam a alcançar o SOC máximo devido ao fato de serem conectados posteriormente aos outros dois EVs, e a tarifa de energia ser

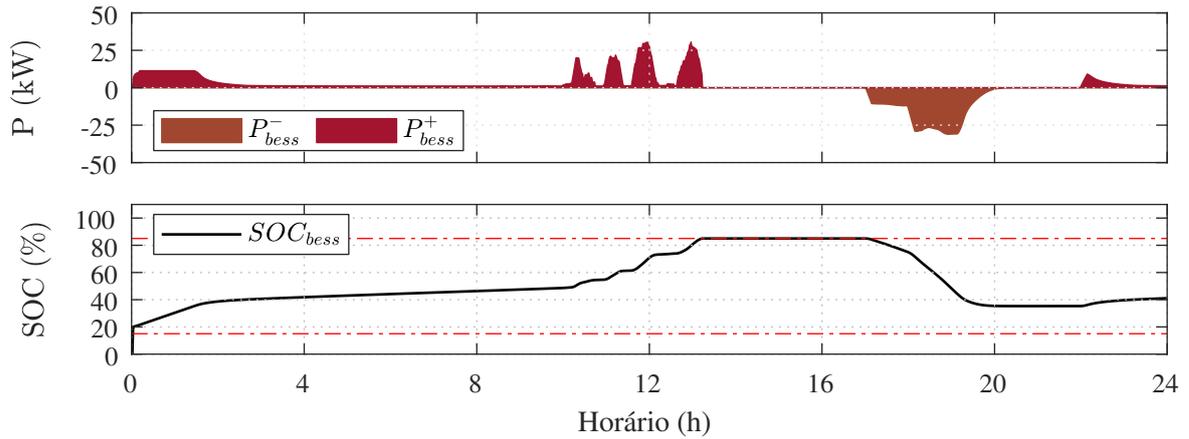


Figura 41 – Potência de operação e SOC do BESS na microrrede no cenário 3.

alterada para intermediária, o que acarretaria em custos mais altos caso fossem carregados nesse período. Portanto, é possível verificar o correto funcionamento do FLC estabelecido para o modo ECO.

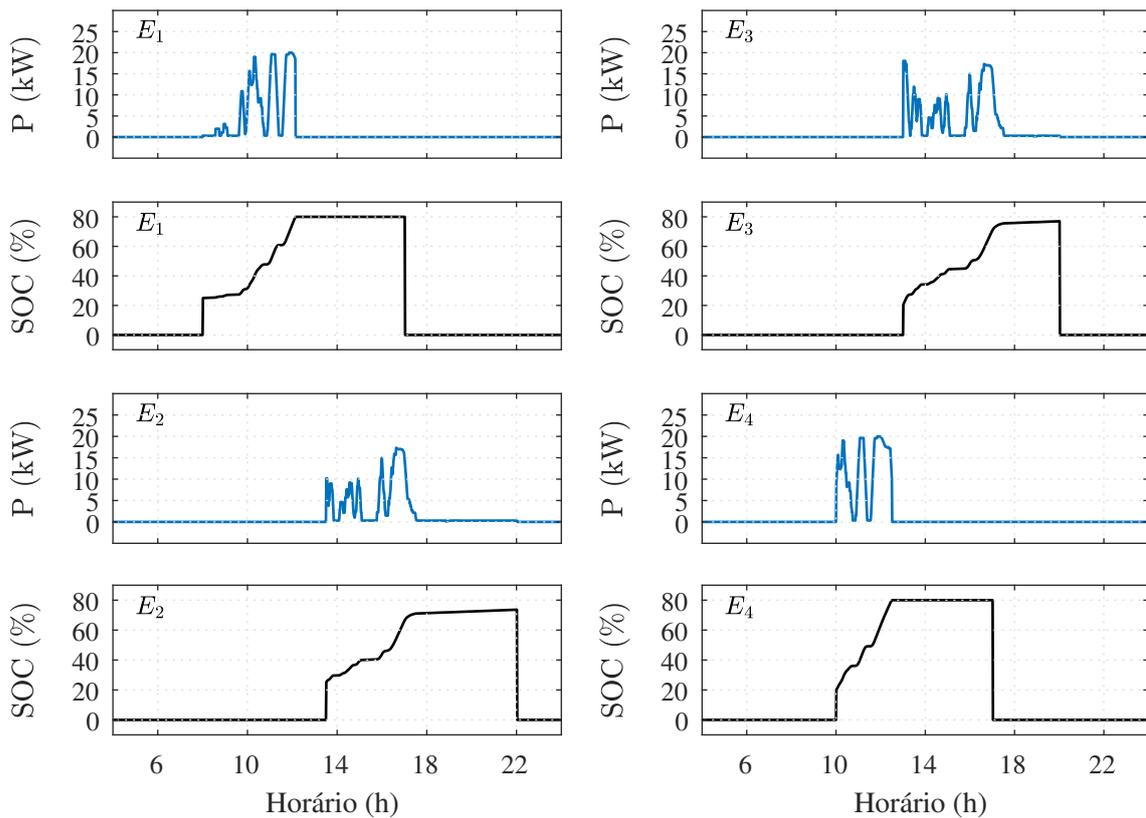
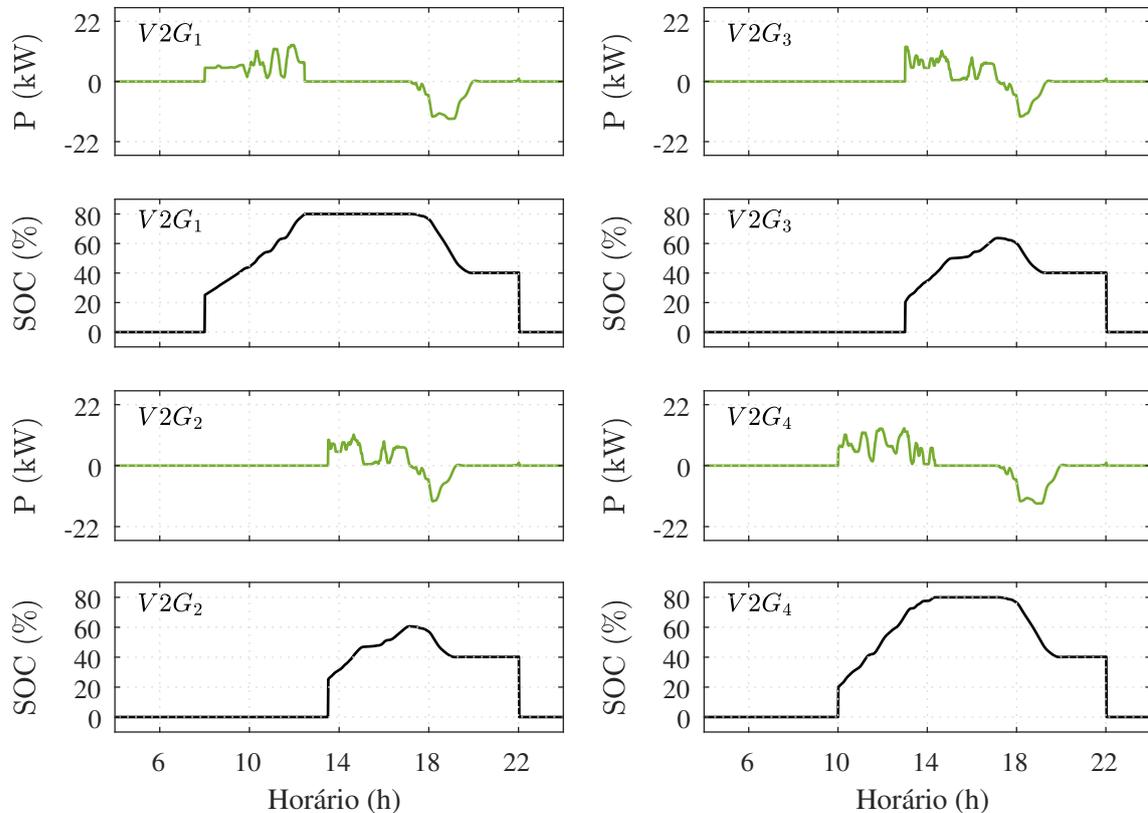


Figura 42 – Potências e SOC dos EVs conectados no modo ECO no cenário 3.

Os EVs no modo V2G também apresentam variações na potência de carregamento no cenário 3 como mostrado na Figura 43. Entretanto, mesmo nessa condição os EVs V2G 1 e 4 atingem o SOC máximo e os EVs V2G 2 e 3 alcançam um SOC satisfatório de

60%. Portanto, todos EVs no modo V2G conseguem contribuir no suporte à microrrede, fornecendo potência para atender a demanda de energia até os SOC's chegarem no valor



**Figura 43 – Potências e SOC's dos EVs conectados no modo V2G no cenário 3.**

de restrição 40%. Portanto, os controladores fuzzy definidos para o modo V2G também funcionam conforme esperado para o cenário 3, atendendo as premissas de carregamento e descarregamento dos EVs no modo.

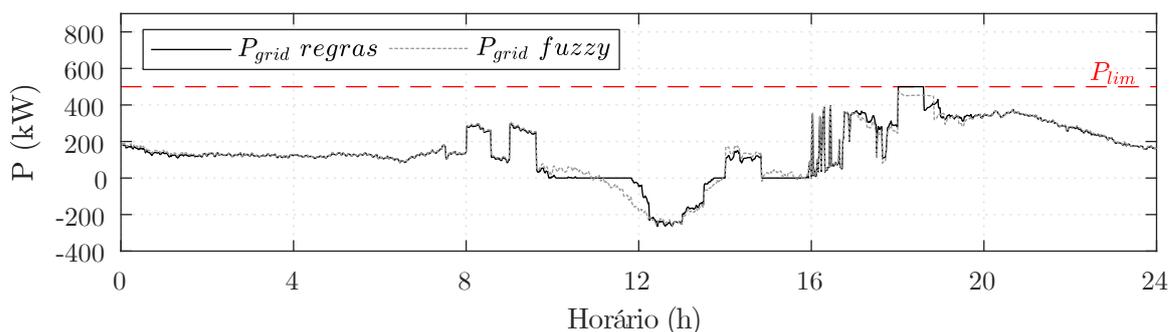
Com base nos resultados obtidos na implementação computacional em simulação do gerenciador proposto, é possível levantar e confirmar algumas características pertinentes em relação ao gerenciamento convencional e o gerenciamento utilizando lógica fuzzy. A Tabela 7 apresenta a comparação entre o gerenciamento convencional e utilizando lógica fuzzy no carregamento de EVs em microrredes com geração fotovoltaica, considerando alguns aspectos pertinentes na aplicação.

**Tabela 7 – Comparação entre o gerenciamento convencional e utilizando lógica fuzzy no carregamento de EVs.**

Aspecto	Gerenciamento Convencional	Gerenciamento com Lógica Fuzzy
Tomada de decisão	Regras fixas	Adaptativo e dinâmico
Adaptação às condições variáveis	Não se adapta às mudanças na geração PV	Considera conjuntos de regras para geração PV
Otimização da geração PV	Não otimiza a utilização da energia PV	Pode otimizar o uso da energia PV
Eficiência energética	Pode resultar em menor eficiência energética	Pode aumentar a eficiência energética
Flexibilidade	Menor flexibilidade para atender às preferências dos usuários de EVs	Maior flexibilidade para atender preferências dos usuários de EVs e permite carregamento personalizado

#### 4.4 COMPARAÇÃO DAS ESTRATÉGIAS DE GERENCIAMENTO

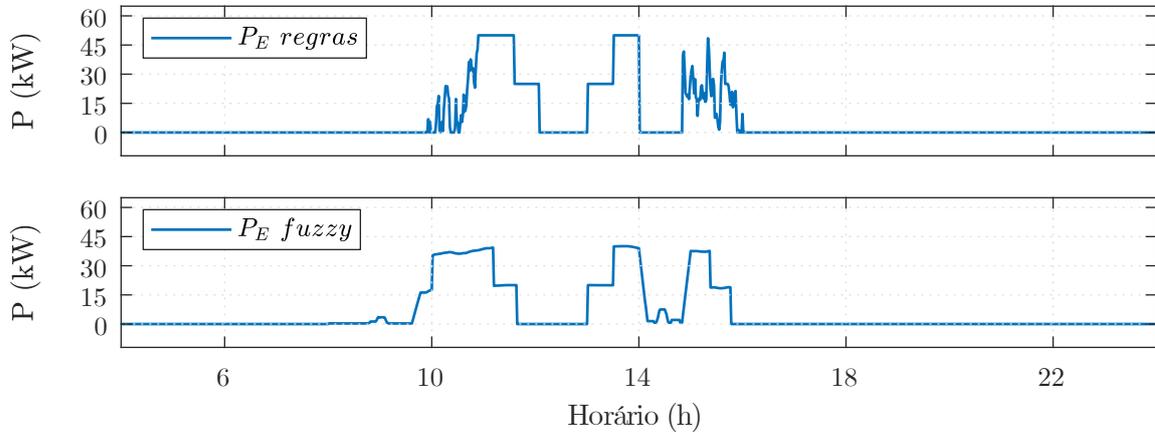
Na Figura 44 verifica-se a comparação do perfil de potência visto pela rede para os gerenciamentos convencional baseado em regras e utilizando lógica fuzzy. As diferenças significativas entre as duas estratégias aparecem nos períodos em que ocorre o excedente de geração PV e também com a alteração do preço da tarifa de energia. No gerenciamento baseado em regras ocorre a limitação de potência devido o carregamento dos EVs atingir a demanda de potência contratada, enquanto que utilizando o gerenciamento com lógica fuzzy o carregamento não atinge esse limite, o que é justificado pelo fornecimento de energia pelos EVs V2G e pelo BESS que já se inicia a partir do momento que a tarifa de energia para do horário fora de ponto para o horário intermediário.



**Figura 44 – Potência da microrrede utilizando o gerenciamento baseado em regras e o gerenciamento com lógica fuzzy.**

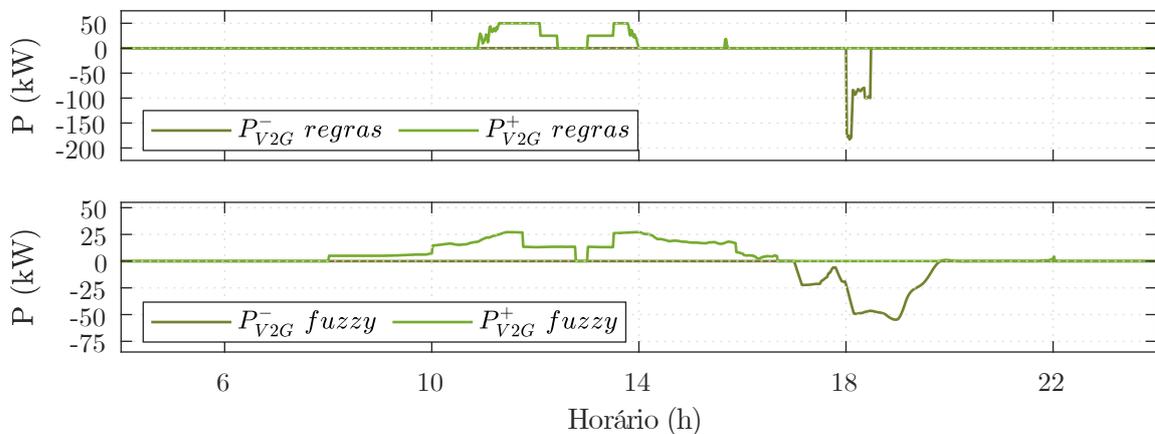
A comparação entre os perfis de potência de carregamento dos EVs no modo ECO utilizando o gerenciamento baseado em regras e o gerenciamento com lógica fuzzy é apresentado na Figura 45. Verifica-se que utilizando o gerenciamento com lógica fuzzy o perfil de potência é mais suave, não apresentando variações bruscas na potência de

carregamento dos EVs ECO. Isso contribui na manutenção da vida útil das baterias dos EVs pois evita variações bruscas no carregamento que podem reduzir o ciclo de vida da bateria.



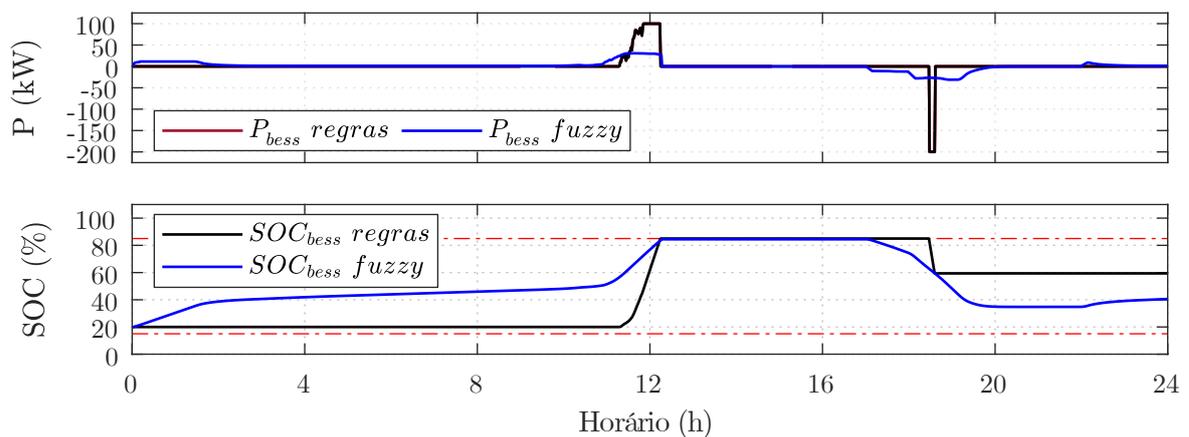
**Figura 45 – Potência do modo ECO utilizando o gerenciamento baseado em regras e o gerenciamento com lógica fuzzy.**

A potência do modo V2G utilizando o gerenciamento baseado em regras e o gerenciamento com lógica fuzzy é ilustrada na Figura 46, onde também verifica-se um perfil de potência de carregamento dos EVs V2G mais suave. Observa-se que utilizando lógica fuzzy na estratégia de gerenciamento os EVs V2G iniciam o carregamento com um nível de potência baixo assim que conectados na estação de carregamento, o que ocorre devido o preço da tarifa de energia ser o menor no horário de conexão. A potência de carregamento do modo V2G aumenta conforme se aproxima do horário que inicia o excedente de geração PV até atingir a potência nominal de carregamento quando o nível de excedente PV é alto, seguindo as premissas e regras adotadas para o modo V2G.



**Figura 46 – Potência do modo V2G utilizando o gerenciamento baseado em regras e o gerenciamento com lógica fuzzy.**

A comparação das curvas de operação do BESS utilizando o gerenciamento baseado em regras e o gerenciamento com lógica fuzzy é ilustrada pela Figura 47. No gerenciamento baseado em regras o BESS carrega no momento em que há excedente de geração PV e descarrega quando o limite de potência contratada é atingido. No caso da utilização de lógica fuzzy no gerenciamento a potência do BESS apresenta uma curva mais suave, aproveitando o período de menor tarifa de energia e o excedente de geração PV. O carregamento do BESS é verificado pelo seu SOC que inicialmente é baixo e vai elevando-se lentamente ao longo do tempo até o horário em que há excedente de geração PV, no qual o BESS carrega com um nível de potência maior. Durante a operação de descarregamento do BESS é possível observar que utilizando lógica fuzzy no gerenciamento já há o fornecimento de potência a partir do horário em que a tarifa de energia é alterada de fora de ponta para intermediária, e aumentando o valor da potência fornecida na tarifa de ponta. Para o caso com lógica fuzzy, reduziu-se a potência nominal de carregamento, uma vez que com essa estratégia foi possível mapear o baixo nível de SOC e o menor preço de energia, carregando o banco de baterias até determinado SOC e fornecendo uma carga lenta até o momento que ocorre excedente de geração PV. Portanto, utilizando lógica fuzzy no gerenciamento foi possível aproveitar melhor a capacidade do BESS ao vender energia e fornecer suporte à microrrede.



**Figura 47 – Potência e SOC do BESS utilizando o gerenciamento baseado em regras e o gerenciamento com lógica fuzzy.**

#### 4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados os resultados de simulação em três cenários distintos obtidos para o sistema de gerenciamento de estações de carregamento EV e BESS. Para cada um dos cenários foram obtidas as potências da microrrede, de carregamento dos EVs e do BESS, além dos SOCs dos EVs dos modos ECO e V2G e o SOC do BESS. Através dos resultados obtidos em simulação foi possível analisar e verificar o funcionamento do sistema de gerenciamento baseado em regras e utilizando lógica fuzzy proposto, objetivando o carregamento dos modos ULTRA e FAST sem interrupimentos e mínima limitação, e buscando carregar os modos ECO e V2G utilizando excedente de geração PV e períodos de baixa demanda. Além disso, através dos resultados verificou-se o suporte à microrrede por meio do modo V2G e do BESS fornecendo energia na operação de descarregamento.

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho propôs e discutiu uma estratégia e arquitetura de gerenciamento de sistemas de carregamento para EVs em microrredes conectadas à rede elétrica externa e com geração distribuída, considerando um arranjo de painéis fotovoltaicos, cargas locais e um sistema de armazenamento de energia de baterias.

Dentro do contexto do sistema de gerenciamento proposto para o carregamento de EVs, foram apresentados os conceitos e modelagens dos elementos presentes na estrutura da microrrede considerada para serem utilizados em simulações computacionais. Além disso, foi desenvolvida uma estratégia de gerenciamento dos sistemas de carregamento de EVs com o intuito de aproveitar melhor o excedente de geração PV e evitar a ultrapassagem da demanda de energia contratada. Diferentes modos de carregamento foram utilizados, os quais possuem diferentes níveis de potência e prioridade de carregamento.

A estratégia de gerenciamento proposta foi inicialmente baseada em regras predefinidas e em diferentes modos de carregamento de EVs. As regras propostas baseiam-se em premissas observadas no carregamento de EVs, na demanda de carga, na geração de PV e no preço da energia. Posteriormente, incluiu-se controladores de lógica fuzzy para gerar as potências de referência para o carregamento de EVs nos modos ECO e V2G, e para a operação de carga e descarga do BESS.

O algoritmo do gerenciador desenvolvido foi implementado em simulação computacional no *software* Matlab para verificar sua resposta considerando um período de análise de um dia e diferentes cenários de geração fotovoltaica. Verificou-se que o gerenciador permitiu uma melhor utilização da geração PV, proporcionando custos de carregamento mais baixos para os usuários de EVs que assim o desejam e lucro para o proprietário do estacionamento, visto que não há necessidade de comprar energia da rede em alguns períodos do dia. Além disso, a aplicação da estratégia de gerenciamento em conjunto com o BESS aumentou a robustez do sistema, permitindo o armazenamento da energia excedente quando a geração PV é maior que a demanda de carga, oferecendo a possibilidade de fornecer serviço ancilar de suporte à microrrede posteriormente em caso de ultrapassagem da demanda de energia contratada e reduzir o nível de potência comprada da rede durante os períodos com maiores tarifas de energia.

Com base nos resultados obtidos o gerenciador proposto mostrou-se capaz de

atender às premissas adotadas para os modos de carregamento EV e a operação do BESS. Portanto, a estratégia de gerenciamento desenvolvida seguiu a ordem de prioridade dos modos de carregamento EV e as características de operação de cada modo.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para possíveis trabalhos futuros na mesma área de pesquisa abordada neste trabalho, pode-se citar:

- Aprimorar as regras e funções de pertinência dos controladores de lógica fuzzy utilizadas no sistema de gerenciamento proposto;
- Aplicar métodos e modelos de previsões de demanda e geração para obter demandas futuras com eficiência;
- Projetar e implementar os controladores das camadas primária e secundária de controle das estações de carregamento, as quais receberão as referências de potências geradas pelo gerenciador proposto nesse trabalho.

## 5.2 TRABALHOS PUBLICADOS

- G. Bruinsma, E. G. Carati, M. Piveta, G. A. Salvatti and C. Rech, "Electric Vehicle Charging Strategy in Smart Grids with Distributed Generation", *2022 14th Seminar on Power Electronics and Control (SEPOC)*, Santa Maria, Brazil, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/SEPOC54972.2022.9976416.

## REFERÊNCIAS

ABRAHAM, Dominic Savio; CHANDRASEKAR, Balaji; RAJAMANICKAM, Narayanamoorthi; VISHNURAM, Pradeep; RAMAKRISHNAN, Venkatesan; BAJAJ, Mohit; PIECHA, Marian; BLAZEK, Vojtech; PROKOP, Lukas. Fuzzy-based efficient control of dc microgrid configuration for pv-energized ev charging station. **Energies**, v. 16, n. 6, 2023.

ACHARIGE, Sithara S. G.; HAQUE, Md. Enamul; ARIF, Mohammad Taufiqul; HOSSEINZADEH, Nasser; HASAN, Kazi N.; OO, Aman Maung Than. Review of electric vehicle charging technologies, standards, architectures, and converter configurations. **IEEE Access**, v. 11, p. 41218–41255, 2023.

AEN. **Copel coloca em operação seu primeiro eletroposto com carregador ultrarrápido**. 2022. Agência Estadual de Notícias do Paraná. Published Dez 21, 2022. Disponível em: <https://www.aen.pr.gov.br/Noticia/Copel-coloca-em-operacao-seu-primeiro-eletroposto-com-carregador-ultrarrapido>.

AHMADIAN, Ali; SEDGHI, Mahdi; ELKAMEL, Ali; FOWLER, Michael; Aliakbar Golkar, Masoud. Plug-in electric vehicle batteries degradation modeling for smart grid studies: Review, assessment and conceptual framework. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 2609 – 2624, 2018.

ALI, Zunaib; PUTRUS, Ghanim; MARZBAND, Mousa; GHOLINEJAD, Hamid Reza; SALEEM, Komal; SUBUDHI, Bidyadhar. Multiobjective optimized smart charge controller for electric vehicle applications. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 58, n. 5, p. 5602–5615, 2022.

ARETXABALETA, Iker; ALEGRÍA, Iñigo Martínez De; ANDREU, Jon; KORTABARRIA, Iñigo; ROBLES, Endika. High-voltage stations for electric vehicle fast-charging: Trends, standards, charging modes and comparison of unity power-factor rectifiers. **IEEE Access**, v. 9, p. 102177–102194, 2021.

BENYSEK, Grzegorz; WAŚKOWICZ, Bartosz; DYLEWSKI, Robert; JARNUT, Marcin. Electric vehicles charging algorithm with peak power minimization, evs charging power minimization, ability to respond to dr signals and v2g functionality. **Energies**, v. 15, n. 14, 2022.

BILBAO, Javier; BRAVO, Eugenio; GARCÍA, Olatz; REBOLLAR, Carolina; VARELA, Concepción. Optimising energy management in hybrid microgrids. **Mathematics**, v. 10, n. 2, 2022.

- CHEN, Z.; LIU, Q.; XIAO, X.; LIU, N.; YAN, X. Integrated mode and key issues of renewable energy sources and electric vehicles' charging and discharging facilities in microgrid. *In: 2nd IET Renewable Power Generation Conference (RPG 2013)*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–4.
- DAS, H.S.; RAHMAN, M.M.; LI, S.; TAN, C.W. Electric vehicles standards, charging infrastructure, and impact on grid integration: A technological review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 120, p. 109618, 2020.
- DUMIAK, Michael. A road test for vehicle-to-grid tech: Utrecht leads the world in using evs for grid storage. **IEEE Spectrum**, v. 59, p. 20–25, 2022.
- EMADI, A. Transportation 2.0. **IEEE Power and Energy Magazine**, v. 9, n. 4, p. 18–29, 2011.
- ESEYE, Abinet Tesfaye; LEHTONEN, Matti; TUKIA, Toni; UIMONEN, Semen; MILLAR, R. John. Optimal energy trading for renewable energy integrated building microgrids containing electric vehicles and energy storage batteries. **IEEE Access**, v. 7, p. 106092–106101, 2019.
- FAVERI, Flavio de; SCHMIDT, Jorge G.; MAKOHIN, Daniel G.; KRAEMER, Rodrigo A. S.; HILLER, Rafael; PICA, Cesare Q.; GIANESINI, Marco A.; JEREMIAS, Thiago. Mitigating electric vehicles recharge demand impacts on the electric grid: e-park case study. *In: 2020 IEEE PES Transmission Distribution Conference and Exhibition - Latin America (TD LA)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–6.
- FERNANDES, Paulo Gentil Gibson. **Conversor Multinível Tipo Escada com Gerenciamento Integrado de Baterias para Veículos Elétricos**. 2016. 163 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2016.
- GAMIL, Mahmoud M.; SENJYU, Tomonobu; MASRUR, Hasan; TAKAHASHI, Hiroshi; LOTFY, Mohammed Elsayed. Controlled v2gs and battery integration into residential microgrids: Economic and environmental impacts. **Energy Conversion and Management**, v. 253, p. 115171, 2022.
- GANDHI, Heta A.; WHITE, Andrew D. City-wide modeling of vehicle-to-grid economics to understand effects of battery performance. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 9, n. 44, p. 14975–14985, 2021.
- GARCÍA-TRIVIÑO, Pablo; OLIVEIRA-ASSÍS, Laís de; SOARES-RAMOS, Emanuel P. P.; SARRIAS-MENA, Raúl; GARCÍA-VÁZQUEZ, Carlos Andrés; FERNÁNDEZ-RAMÍREZ, Luis M. Supervisory control system for a grid-connected mvdc microgrid based on z-source converters with pv, battery storage, green hydrogen system and charging station of electric vehicles. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 59, n. 2, p. 2650–2660, 2023.

GARCÍA-TRIVIÑO, Pablo; OLIVEIRA-ASSÍS, Laís de; SOARES-RAMOS, Emanuel P. P.; SARRIAS-MENA, Raúl; GARCÍA-VÁZQUEZ, Carlos Andrés; FERNÁNDEZ-RAMÍREZ, Luis M. Supervisory control system for a grid-connected mvdc microgrid based on z-source converters with pv, battery storage, green hydrogen system and charging station of electric vehicles. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 59, p. 2650–2660, 2023.

GHOLAMI MAJID MEHRASA, Reza Razi Khaled Hajar Ahmad Hably et al. Mehrdad. Smart charging strategy for electric vehicles using an optimized fuzzy logic system. *In: EPE 2022 ECCE Europe - 24th European Conference on Power Electronics and Applications*. [S.l.: s.n.], 2022.

GOLDSTEIN, Harry. What v2g tells us about evs and the grid: Vehicle-to-grid technology adds another layer of complexity to the electric-vehicle transition. **IEEE Spectrum**, v. 59, p. 2–2, 2022.

GUARNIERI, M. Looking back to electric cars. *In: 2012 Third IEEE HISTory of ELection-technology CONference (HISTELCON)*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–6.

HAJIAGHASI, Salman; SALEMNIA, Ahmad; HAMZEH, Mohsen. Hybrid energy storage system for microgrids applications: A review. **Journal of Energy Storage**, v. 21, p. 543 – 570, 2019.

HAMIDI, Amir; NAZARPOUR, Daryoush; GOLSHANNAVAZ, Sajjad. Multiobjective scheduling of microgrids to harvest higher photovoltaic energy. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 14, n. 1, p. 47–57, 2018.

HANNAN, M.A.; HOQUE, M.M.; MOHAMED, A.; AYOB, A. Review of energy storage systems for electric vehicle applications: Issues and challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 69, p. 771 – 789, 2017.

HUSSAIN, Shahid; AHMED, Mohamed A.; KIM, Young-Chon. Efficient power management algorithm based on fuzzy logic inference for electric vehicles parking lot. **IEEE Access**, v. 7, p. 65467–65485, 2019.

IEA. **Electric Vehicles**. 2021. License: CC BY 4.0. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/electric-vehicles>.

KANE, Mark. **ABB Installed The First Terra 360 Chargers**. 2022. InsideEVs. Published May 4, 2022. Disponível em: <https://insideevs.com/news/583774/abb-installed-first-terra-360-chargers/>.

KHALID, Mohd Rizwan; KHAN, Irfan A.; HAMEED, Salman; ASGHAR, M. Syed Jamil; RO, Jong-Suk. A comprehensive review on structural topologies, power levels, energy

storage systems, and standards for electric vehicle charging stations and their impacts on grid. **IEEE Access**, v. 9, p. 128069–128094, 2021.

KHOOBAN, Mohammad-Hassan. Secondary load frequency control of time-delay stand-alone microgrids with electric vehicles. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 65, n. 9, p. 7416–7422, 2018.

KUMAR, Dinesh; ZARE, Firuz; GHOSH, Arindam. Dc microgrid technology: System architectures, ac grid interfaces, grounding schemes, power quality, communication networks, applications, and standardizations aspects. **IEEE Access**, v. 5, p. 12230–12256, 2017.

LEONE, Carola; LONGO, Michela; FERNÁNDEZ-RAMÍREZ, Luis M.; GARCÍA-TRIVIÑO, Pablo. Multi-objective optimization of pv and energy storage systems for ultra-fast charging stations. **IEEE Access**, v. 10, p. 14208–14224, 2022.

LI, Yuanzheng; NI, Zhixian; ZHAO, Tianyang; ZHONG, Tianwei; LIU, Yun; WU, Lei; ZHAO, Yong. Supply function game based energy management between electric vehicle charging stations and electricity distribution system considering quality of service. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 56, p. 5932–5943, 2020.

LIBICH, Jiří; MÁCA, Josef; VONDRÁK, Jiří; ČECH, Ondřej; SEDLAŘÍKOVÁ, Marie. Supercapacitors: Properties and applications. **Journal of Energy Storage**, v. 17, p. 224 – 227, 2018.

LIU, Wei; PLACKE, Tobias; CHAU, K.T. Overview of batteries and battery management for electric vehicles. **Energy Reports**, v. 8, p. 4058–4084, 2022.

MOHAMED, Ahmed; SALEHI, Vahid; MA, Tan; MOHAMMED, Osama. Real-time energy management algorithm for plug-in hybrid electric vehicle charging parks involving sustainable energy. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, v. 5, n. 2, p. 577–586, 2014.

MONCECCHI, Matteo; RANCILIO, Giuliano; DIMOVSKI, Aleksandar; BOVERA, Filippo. Smart charging algorithm for flexibility provision with electric vehicle fleets. *In: 2021 IEEE 15th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG)*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1–8.

MOZAFAR, Mostafa Rezaei; AMINI, M. Hadi; MORADI, M. Hasan. Innovative appraisalment of smart grid operation considering large-scale integration of electric vehicles enabling v2g and g2v systems. **Electric Power Systems Research**, v. 154, p. 245–256, 2018.

MOZAFAR, Mostafa Rezaei; AMINI, M. Hadi; MORADI, M. Hasan. Innovative appraisalment of smart grid operation considering large-scale integration of electric vehicles enabling v2g and g2v systems. **Electric Power Systems Research**, v. 154, p. 245 – 256, 2018.

MWASILU, Francis; JUSTO, Jackson John; KIM, Eun-Kyung; DO, Ton Duc; JUNG, Jin-Woo. Electric vehicles and smart grid interaction: A review on vehicle to grid and renewable energy sources integration. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 34, p. 501 – 516, 2014.

NASERI, F.; FARJAH, E.; GHANBARI, T. An efficient regenerative braking system based on battery/supercapacitor for electric, hybrid, and plug-in hybrid electric vehicles with bldc motor. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 66, n. 5, p. 3724–3738, 2017.

NOGUEIRA, Teresa; SOUSA, Ezequiel; ALVES, Gustavo R. Electric vehicles growth until 2030: Impact on the distribution network power. **Energy Reports**, v. 8, p. 145–152, 2022.

NOUR, Morsy; SAID, Sayed M.; ALI, Abdelfatah; FARKAS, Csaba. Smart charging of electric vehicles according to electricity price. *In: 2019 International Conference on Innovative Trends in Computer Engineering (ITCE)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 432–437.

PARMAR, Chirag; TIWARI, Sheela. Fuzzy logic based charging of electric vehicles for load management of microgrid. *In: 2020 5th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–7.

PEREIRA, A. L.; FARDIN, J. F.; ENCARNAÇÃO, L. F. Electric vehicles as motivators for smart grids. *In: 2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–6.

POSSAMAI, Carlos Eduardo. **Conversor Modular Aplicado ao Carregamento de Veículos Elétricos a Partir de uma Bateria Estacionária Residencial**. 2018. 238 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2018.

REDDY, K. Jyotheeswara; NATARAJAN, Sudhakar. Energy sources and multi-input dc-dc converters used in hybrid electric vehicle applications – a review. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 43, n. 36, p. 17387 – 17408, 2018.

RIVERA, Sebastian; KOURO, Samir; VAZQUEZ, Sergio; GOETZ, Stefan M.; LIZANA, Ricardo; ROMERO-CADAVAL, Enrique. Electric vehicle charging infrastructure: From grid to battery. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, v. 15, n. 2, p. 37–51, 2021.

SALVATTI, Gabriel Antonio. **Integração de veículos elétricos em redes inteligentes para otimização e suporte à geração distribuída**. 2020. 117 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, PR, 2020.

SALVATTI, Gabriel Antonio; CARATI, Emerson Giovani; CARDOSO, Rafael; COSTA, Jean Patric da; STEIN, Carlos Marcelo de Oliveira. Electric vehicles energy management with v2g/g2v multifactor optimization of smart grids. **Energies**, v. 13, n. 5, 2020.

SILVA, Juliana Oliveira da. **Sistemas de armazenamento de energia elétrica em smart grids**. 2020. 137 p. Dissertação (Mestrado) — Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, Portugal, 2020.

TAN, Kang Miao; RAMACHANDARAMURTHY, Vigna K.; YONG, Jia Ying. Integration of electric vehicles in smart grid: A review on vehicle to grid technologies and optimization techniques. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 720–732, 2016.

TAN, Kang Miao; RAMACHANDARAMURTHY, Vigna K.; YONG, Jia Ying. Integration of electric vehicles in smart grid: A review on vehicle to grid technologies and optimization techniques. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 720–732, 2016.

TENG, Jen-Hao; LIAO, Shu-Hung; WEN, Chao-Kai. Design of a fully decentralized controlled electric vehicle charger for mitigating charging impact on power grids. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 53, n. 2, p. 1497–1505, 2017.

USTUN, Taha Selim; ZAYEGH, Aladin; OZANSOY, Cagil. Electric vehicle potential in australia: Its impact on smartgrids. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, v. 7, p. 15–25, 2013.

WANG, Bo; DEGHANIAN, Payman; ZHAO, Dongbo. Chance-constrained energy management system for power grids with high proliferation of renewables and electric vehicles. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 11, n. 3, p. 2324–2336, 2020.

WILCZEK, P. Connecting the dots: distribution grid investments to power the energy transition. *In: 11th Solar Storage Power System Integration Workshop (SIW 2021)*. [S.l.: s.n.], 2021. v. 2021, p. 1–18.

WU, Wei; LIN, Boqiang. Benefits of electric vehicles integrating into power grid. **Energy**, v. 224, p. 120108, 2021.

WU, Yu; WANG, Ziliang; HUANGFU, Yigeng; RAVEY, Alexandre; CHRENKO, Daniela; GAO, Fei. Hierarchical operation of electric vehicle charging station in smart grid integration applications — an overview. **International Journal of Electrical Power Energy Systems**, v. 139, p. 108005, 2022.

YUAN, Jiaqi; DORN-GOMBA, Lea; CALLEGARO, Alan Dorneles; REIMERS, John; EMADI, Ali. A review of bidirectional on-board chargers for electric vehicles. **IEEE Access**, v. 9, p. 51501–51518, 2021.

ZADEH, L.A. Fuzzy sets. **Information and Control**, v. 8, n. 3, p. 338–353, 1965.

ZHOU, Quan; SHAHIDEHPOUR, Mohammad; PAASO, Aleks; BAHRAMIRAD, Shay; ALABDULWAHAB, Ahmed; ABUSORRAH, Abdullah. Distributed control and communication strategies in networked microgrids. **IEEE Communications Surveys Tutorials**, v. 22, n. 4, p. 2586–2633, 2020.