

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

John Jefferson Antunes Saldanha

**Sistema Inteligente para o Controle da Recarga
de Veículos Elétricos Híbridos *Plug-in* Visando
o Benefício do Sistema Elétrico de Potência**

Alegrete

2015

John Jefferson Antunes Saldanha

**Sistema Inteligente para o Controle da Recarga de
Veículos Elétricos Híbridos *Plug-in* Visando o Benefício
do Sistema Elétrico de Potência**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Ana Paula Carboni de Mello

Alegrete

2015

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

S162s Saldanha, John Jefferson Antunes

Sistema Inteligente para o Controle da Recarga de Veículos
Elétricos Híbridos Plug-in Visando o Benefício do Sistema
Elétrico de Potência / John Jefferson Antunes Saldanha.

87 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade
Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA, 2015.

"Orientação: Ana Paula Carboni de Mello".

1. Engenharia Elétrica. 2. Sistemas Elétricos de Potência.
3. Veículos Elétricos. I. Título.

Autoria: John Jefferson Antunes Saldanha

Título: SISTEMA INTELIGENTE PARA O CONTROLE DE RECARGA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS HÍBRIDOS PLUG-IN VISANDO O BENEFÍCIO DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte das atividades para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa.

Os componentes da banca, abaixo listados, consideram este trabalho aprovado

	Nome	Titulação	Instituição	Assinatura
1	Ana Paula Carboni de Mello	Prof. Me.	unipampa	Ana Paula Carboni de Mello
2	Jumar Luis Russi	Prof. Dr.	unipampa	Jumar Luis Russi
3	Eduardo Machado dos Santos	Prof. Dr.	unipampa	Eduardo M. dos Santos

Data da aprovação: 27 de Novembro de 2015.

*Dedico este trabalho à minha família,
por todo apoio, força, incentivo,
motivação e amizade.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Marcos e Angelita, e ao meu irmão José Orlando por guiarem meu caminho, dando suporte, apoio, incentivo, exemplo e amizade em todos momentos. Nenhum trabalho teria sido feito, nenhuma graduação começada, nenhum passo em busca de ser uma pessoa melhor teria sido tomado se não fosse por eles. Muito obrigado!

Agradeço imensamente à professora, orientadora e colega Ana Paula Carboni de Mello por ter abraçado este trabalho de uma forma incrível, permitindo que eu o desenvolvesse, e contribuindo de forma imensurável.

Agradeço aos colegas do GESEP, Alex, Ana Lorenzoni, Arian, Djonathan, Fabiana, Giovanni, Jefferson, João Pedro, Paulo e Rafael, que me suportaram na sala de pesquisa do grupo.

Agradeço também aos colegas do Apê 301, João Paulo, Tulio e Peter, pelas conversas, risadas e motivações durante esta jornada.

Agradeço aos membros da banca, Professores Eduardo Machado dos Santos e Jumar Luís Russi, que contribuíram para a construção deste trabalho com todos os conselhos e dicas.

Agradeço aos atuais e antigos colegas de curso, por todas as experiências compartilhadas, entre eles, Luiz da Silva Jr., João Nizer, Willian Deliberalli, Marcelo Magalhães, Alian Engroff, Leonardo Tomazine, Dionatas Longaretti e ao também colega de estágio João Machiavelli.

Agradeço a todos os professores da UNIPAMPA que colaboraram para meu crescimento profissional.

Agradeço aos colegas do apartamento J10/H11 do James Blyth Court e do apartamento 10B do Birkbeck Court e os colegas e os professores da University of Strathclyde, em Glasgow.

E a todos os demais que contribuíram e me incentivaram nessa caminhada, um muito obrigado.

*“O sucesso nasce do querer, da determinação
e persistência em se chegar a um objetivo.
Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence
obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis.”*
(José de Alencar)

*“Aqueles que se sentem satisfeitos sentam-se e nada fazem.
Os insatisfeitos são os únicos benfeitores do mundo.”*
(Walter S. Landor)

RESUMO

Os veículos elétricos híbridos *plug-in* (VEHP) são vistos como uma importante medida para reduzir as emissões poluentes na atmosfera. Estes veículos precisam ser conectados na rede elétrica para recarregar suas baterias. Assim, se uma grande quantidade de VEHPs requisitarem recarga simultaneamente e sem nenhuma coordenação adequada, problemas na operação do sistema elétrico podem se originar. Logo, é importante realizar um controle de recarga coordenado dos veículos elétricos. Os VEHPs também podem auxiliar a rede elétrica através do controle da taxa de recarga e injeção de energia ativa. Dessa forma, este trabalho propõe um sistema para controle da recarga de veículos elétricos híbridos *plug-in* visando o benefício da rede de energia elétrica e do consumidor. Neste trabalho, uma estratégia para realizar o controle da recarga e uma técnica de otimização serão aplicadas, utilizando um software de simulação de redes de distribuição e um ambiente de programação. Com o sistema desenvolvido, espera-se reduzir o impacto no sistema elétrico de potência e otimizar sua operação, beneficiando a concessionária local, a rede elétrica e o consumidor.

Palavras-chave: Controle da recarga. Otimização da operação. Sistema de inferência fuzzy. Veículos elétricos híbridos *plug-in*.

ABSTRACT

Plug-in hybrid electric vehicles (PHEV) are seen as an important alternative to reduce pollutant emissions into the atmosphere. These vehicles need to be connected to the power grid to recharge their batteries. Thus, if a considerable amount of PHEVs request charge simultaneously and without proper coordination, problems in the power system operation may arise. Therefore, it is important to carry out a coordinated charging control of electric vehicles. The PHEVs can also aid the power grid by controlling the charging rate and injecting active power. Given so, this work proposes a system for the charging control of plug-in hybrid electric vehicles seeking the power grid and consumer benefits. In this work, a strategy to control the charging and an optimisation technique will be applied using a distribution system simulation software and a programming environment. With the developed system it is expected to mitigate the impact on the power grid and optimize its operation, benefiting the local utility, the electrical grid and the consumer.

Keywords: Charging control. Fuzzy inference system. Optimisation of operation. Plug-in hybrid electric vehicles.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema ilustrativo da comunicação entre o agregador e o sistema elétrico de potência.	37
Figura 2 – Arquitetura geral do Sistema Inteligente para o Controle da Recarga de Veículos Elétricos Híbridos <i>Plug-In</i> Visando o Benefício do Sistema Elétrico de Potência.	55
Figura 3 – Fluxograma de funcionamento geral do sistema de controle da recarga proposto.	56
Figura 4 – Estrutura do controlador fuzzy para esta aplicação.	61
Figura 5 – Conjuntos fuzzy para a variável de entrada ΔSOC	62
Figura 6 – Conjuntos fuzzy para a variável de entrada prioridade.	62
Figura 7 – Conjuntos fuzzy para a variável de saída taxa de recarga (TxR).	63
Figura 8 – Taxas de recarga para alguns dos VEHPs da frota sob estudo.	69
Figura 9 – Estados de carga atualizados para alguns dos VEHPs da frota sob estudo.	70
Figura 10 – Estados de carga atualizados para alguns dos VEHPs da frota sob estudo considerando uma mudança na prioridade do VEHP 3.	71
Figura 11 – Taxas de recarga de um VEHP com sua prioridade alterada, mas demais parâmetros inalterados.	72
Figura 12 – Estado de carga de um VEHP com sua prioridade alterada, mas demais parâmetros inalterados.	73
Figura 13 – Número de iterações necessárias para recarregar os VEHPs em função de P_D	74
Figura 14 – Somatório de todos os ΔSOC com a variação de P_D	74
Figura 15 – Alimentador teste IEEE 34 barras utilizado para as simulações.	75
Figura 16 – Frotas de VEHPs alocadas e suas respectivas potências mínima e máxima no alimentador teste.	76
Figura A.1 – Exemplos de funções de pertinência para (a) conjunto clássico e (b) conjunto fuzzy.	92
Figura A.2 – Arquitetura geral do mapeamento da entrada para a saída.	93
Figura A.3 – Descrição geral de um sistema de inferência fuzzy.	94
Figura A.4 – Características de uma função de pertinência.	95
Figura A.5 – Funções de pertinência mais comuns: (a) trapezoidal, (b) triangular, (c) Gaussiana e (d) sigmoide.	96
Figura A.6 – Exemplo de funções de pertinência representando três conjuntos fuzzy do estado de carga da bateria de um veículo elétrico <i>plug-in</i>	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais comparações entre VEB, VEH e VEHP.	30
Tabela 2 – Crescimento da carga de pico com a recarga sem coordenação dos VEPs em diferentes estudos.	33
Tabela 3 – Comparação entre fluxos de potência unidirecional e bidirecional. . . .	42
Tabela 4 – Conjunto de regras criadas para atuar no controlador fuzzy.	64
Tabela 5 – TxR^* ativada para diferentes combinações das variáveis de entrada ΔSOC e <i>prioridade</i>	64
Tabela 6 – Dados obtidos para os três casos sem otimização.	77
Tabela 7 – Dados obtidos para os três casos com otimização.	78
Tabela A.1 – Forma alternativa para representar as regras com dois antecedentes. . .	95

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

COD	Centro de Operação da Distribuição
VE	Veículo Elétrico
VEP	Veículo Elétrico Plug-in
VEB	Veículo Elétrico a Bateria
VEH	Veículo Elétrico Híbrido
VEHP	Veículo Elétrico Híbrido <i>Plug-in</i>
SEP	Sistema Elétrico de Potência
MCI	Motor de Combustão Interna
V2G	Veículo-para-rede, do inglês <i>Vehicle-to-Grid</i>
SMES	Armazenamento de Energia Elétrica por Supercondução, do inglês <i>Superconducting Magnetic Energy Storage</i>
QP	Programação Quadrática, do inglês <i>Quadratic Programming</i>
DP	Programação Dinâmica, do inglês <i>Dynamic Programming</i>
OS	Operador do Sistema
FLP	Programação Linear Fuzzy, do inglês <i>Fuzzy Linear Programming</i>
DPSO	Otimização por Enxame de Partículas Discreta, do inglês <i>Discrete Particle Swarm Optimisation</i>
FDPSO	Otimização por Enxame de Partículas Discreta Fuzzy, do inglês <i>Fuzzy Discrete Particle Swarm Optimisation</i>
ARMA	Modelo Auto-regressivo de Médias Móveis, do inglês <i>Autoregressive Moving Average Models</i>
AIS	Sistemas Artificiais Imunes, do inglês <i>Artificial Immune Systems</i>
SOC	Estado de Carga, do inglês <i>State Of Charge</i>
DSS	Simulador de Sistemas de Distribuição, do inglês <i>Distribution System Simulator</i>

IEEE

Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos, do inglês *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

LISTA DE SÍMBOLOS

SOC_i	Estado de carga inicial
SOC_f	Estado de carga final
t_i	Horário da conexão do veículo na rede elétrica
t_f	Horário da desconexão do veículo na rede elétrica
B_{cap}	Capacidade da bateria
<i>prioridade</i>	Prioridade inserida pelo consumidor para o seu veículo ser totalmente recarregado dentro do período estipulado
P_{min_A}	Potência mínima do agregador
P_{max_A}	Potência máxima do agregador
TxR^*	Taxa de recarga inicial
TxR	Taxa de recarga final
P_D^*	Potência inicial a ser disponibilizada para o agregador
P_D	Potência disponibilizada para o agregador
i	Índice que indica o VEHP
n_{VEHP}	Número de VEHPs no agregador
P_{VEHP_i}	Potência requisitada pelo VEHP i
Δt_{VEHP}	Período de tempo que o VEHP ficará conectado para recarregar
Δt_{SOC}	Período de tempo necessário para recarregar o VEHP com a taxa de recarga atual
ΔSOC	Porcentagem do estado de carga que deve ser recarregado
w	Peso que limita as potências por cada faixa de prioridade dos VEHPs
l	Índice que indica a linha de distribuição do sistema
n_l	Número total de linhas de distribuição do sistema
R_l	Resistência da linha l

I_l	Corrente elétrica na linha l
j	Índice que indica o agregador
α	Constante adimensional para permitir um pequeno incremento na taxa de recarga
Δt	Período de discretização da simulação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	Objetivos	26
1.2	Organização do trabalho	27
2	VEÍCULOS ELÉTRICOS <i>PLUG-IN</i> NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA	29
2.1	Veículos elétricos	29
2.2	Impacto da recarga dos VEPs	31
2.3	Benefícios dos VEPs	35
2.3.1	Vantagens em termos ambientais	35
2.3.2	Serviços auxiliares	36
2.3.3	Outros benefícios	39
2.4	Desafios do conceito V2G	40
3	ESTRATÉGIAS E MÉTODOS PARA RECARGAS	41
3.1	Recarga descoordenada	42
3.2	Recarga coordenada	43
3.2.1	Fluxo de potência unidirecional	43
3.2.2	Fluxo de potência bidirecional	47
4	SISTEMA DE CONTROLE DA RECARGA DE VEHPs	53
4.1	Considerações iniciais	53
4.2	Sistema de controle da recarga	54
4.3	Cálculo das potências máxima e mínima	57
4.4	Estratégia de otimização	58
4.5	Modelagem do controlador fuzzy aplicada ao controle da recarga	60
4.5.1	Funções de pertinência	61
4.5.2	Conjunto de regras	63
4.5.3	Outros parâmetros	64
4.6	Cálculo da taxa de recarga	65
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	69
5.1	Frota de VEHPs se recarregando	69
5.2	Influência da prioridade	72
5.3	Influência de P_D	73
5.4	Estratégia de otimização	75

6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	79
6.1	Trabalhos futuros	80
6.2	Publicações	80
	REFERÊNCIAS	83
	APÊNDICE A – LÓGICA E SISTEMA DE INFERÊNCIA FUZZY .	91

1 INTRODUÇÃO

A indústria automotiva está crescendo rapidamente e os veículos movidos por combustíveis fósseis compõem a maior parcela deste setor. Entretanto, preocupações com o meio ambiente também têm crescido consideravelmente, levantando sérias questões sobre os efeitos prejudiciais dos poluentes emitidos pelos automóveis. Aliado a estes motivos, também existe um aumento das preocupações com a segurança energética e reservas de energia fóssil, o que vêm promovendo uma difusão considerável pelo uso dos veículos elétricos *plug-in* (VEPs) em comparação aos movidos a combustão.

Os VEPs apresentam-se como uma alternativa para reduzir as emissões dos veículos movidos a combustão interna e ao mesmo tempo diminuir a dependência do setor automotivo em combustíveis fósseis. Estes veículos são movidos por motores elétricos alimentados por energia armazenada em suas baterias, podendo ter apenas motores elétricos (puramente elétricos) ou motores elétricos em conjunto com motores a combustão (híbridos).

As frotas de veículos elétricos híbridos *plug-in* (VEHPs) possuem projeções de crescimento mais otimistas frente aos puramente elétricos por apresentarem maior autonomia e ao mesmo tempo baixo índice de emissão de poluentes locais. Assim, o VEHP é uma tecnologia proeminente com grande expectativa de exercer um papel fundamental na indústria automotiva.

Ambos os tipos veículos elétricos *plug-in* precisam se conectar na rede elétrica de tempo em tempo para recarregar suas baterias. Neste caso, o veículo consome energia do sistema atuando como carga para o mesmo. Se uma quantidade significativa de veículos requisitar recarga sem que uma coordenação adequada seja aplicada, a operação do sistema elétrico poderá passar por certas complicações. Isto é especialmente verdade durante períodos de pico, quando sobrecargas e tensões inadequadas podem surgir nas redes de distribuição. Em adição, problemas de estabilidade e o despacho de plantas termoelétricas caras e poluentes para suprir o aumento na demanda também podem ocorrer.

Apesar dos impactos, os VEHPs também podem atuar em benefício da rede elétrica prestando serviços auxiliares. Os veículos atuando neste conceito são chamados de veículo-para-rede (do inglês *vehicle-to-grid*), abreviados como V2G, e duas abordagens podem existir. A primeira consiste em controlar a taxa na qual o veículo consome energia da rede, sendo este valor definido para cada unidade de acordo com uma estratégia de recarga que tem informações sobre a condição do sistema. A segunda abordagem, além de considerar o controle da taxa de recarga, também inclui a injeção de energia ativa na rede pelo veículo, ou seja, controlando a taxa de descarga. Entretanto, a primeira abordagem é a mais próxima e plausível de ser aplicada por questões de infraestrutura da rede, comunicação e

menor estresse causado na bateria do veículo devido as recargas e descargas.

Sabe-se então que os impactos decorrentes dos VEHPs no sistema elétrico podem ser minimizados e benefícios podem ser atingidos com a aplicação de uma estratégia de controle de recarga, minimizando o impacto sobre a rede elétrica.

O VEHP só será utilizado para auxiliar a rede elétrica caso o consumidor esteja disposto a fornecer o automóvel para este propósito. Assim, além de levar em conta a condição atual do sistema elétrico, deve-se considerar os requerimentos do consumidor em ter seu veículo totalmente recarregado dentro do tempo de conexão para recarga. Com este requerimento, o proprietário define se irá precisar do veículo após a recarga ou não, disponibilizando-o para auxiliar o sistema.

Dessa forma, define-se que o proprietário do veículo deve inserir uma prioridade na qual deseja que sua bateria seja totalmente preenchida dentro do tempo de conexão para recarga. Nesse contexto, um valor baixo indica que ele está disposto a fornecer seu VEHP para a rede, podendo sua bateria não estar totalmente recarregada após a desconexão. Uma prioridade alta garante a recarga completa, não fornecendo o veículo para beneficiar o sistema elétrico. Por ser um conhecimento definido pelo consumidor e tratando-se de uma incerteza para o sistema, a inserção da prioridade é realizada através da aplicação de um sistema baseado em lógica fuzzy, pois esta possibilita a incorporação do conhecimento humano em modelagens matemáticas.

Esta prioridade inserida pelo consumidor é o diferencial da metodologia proposta, dado que os trabalhos disponíveis na literatura não consideram este tipo de informação no controle da taxa de recarga.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral:

- Desenvolver um sistema baseado em lógica fuzzy para o controle da taxa de recarga de veículos elétricos híbridos *plug-in* visando minimizar as perdas do sistema elétrico de potência.

Os objetivos específicos são:

- Investigar os principais impactos e benefícios da recarga e descarga dos VEPs no sistema elétrico de potência;
- Analisar as principais estratégias e métodos para recarga apresentadas pela literatura;
- Definir as variáveis e estrutura do sistema de recarga;

- Aplicar a lógica fuzzy no controle da recarga dos VEHPs;
- Aplicar a estratégia de otimização para minimizar as perdas do sistema;
- Verificar a influência da prioridade inserida pelo consumidor na recarga de um VEHP;
- Investigar a importância da estratégia de otimização na operação do sistema.

1.2 Organização do trabalho

Os Capítulos 2 e 3 expõem a revisão bibliográfica deste trabalho. O Capítulo 2 apresenta uma visão geral dos veículos elétricos no sistema elétrico de potência, apresentando os principais impactos, benefícios e desafios que se impõem a esta tecnologia. No Capítulo 3, descrevem-se os principais métodos e estratégias para recarga coordenada e descoordenada dos veículos elétricos *plug-in* disponíveis na literatura.

O Capítulo 4 apresenta a metodologia deste trabalho, abordando o sistema de controle da recarga proposto, a modelagem do controlador fuzzy e a estratégia de otimização aplicada.

O Capítulo 5 expõe os resultados extraídos do sistema, apresentando uma frota de VEHPs se recarregando, a influência da prioridade e da potência disponível na recarga e a importância da estratégia de otimização na operação do sistema.

As considerações finais do trabalho são descritas no Capítulo 6, onde também apresentam-se sugestões de trabalhos futuros e relatam-se as publicações que foram alcançadas com este estudo.

Por fim, o Apêndice A apresenta-se uma abordagem geral da lógica fuzzy e dos sistemas de inferência fuzzy.

2 VEÍCULOS ELÉTRICOS *PLUG-IN* NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

Este capítulo apresenta uma visão geral dos veículos elétricos no sistema elétrico de potência, principalmente no sistema de distribuição, explicitando alguns conceitos gerais, impactos, benefícios e desafios a serem superados. A primeira seção apresenta a diferenciação entre os tipos de veículos elétricos e uma comparação entre eles, expondo os principais pontos e problemas e algumas projeções de crescimento. Na seção seguinte, apresentam-se os impactos que a recarga sem coordenação dos veículos elétricos *plug-in* podem causar na rede de energia elétrica. Na sequência, expõem-se os principais benefícios decorrentes da adesão dos veículos em termos ambientais, serviços auxiliares para a rede e demais benefícios. Por fim, a quarta seção apresenta os principais desafios associados a baixa implementação dos veículos sob estudo.

2.1 Veículos elétricos

Os veículos elétricos (VEs) são veículos propulsionados por motores elétricos, sendo estes últimos alimentados pela energia elétrica armazenada em dispositivos de armazenamento de energia, como baterias e supercapacitores. De forma geral, eles podem ser classificados em três grupos distintos: à bateria (VEB), híbrido (VEH) e híbrido *plug-in* (VEHP). Uma classificação mais abrangente, denominada veículos elétricos *plug-in* (VEP), é comumente utilizada para englobar os VEBs e VEHPs, pois ambos necessitam conectar-se na rede elétrica para o processo de recarga.

Os veículos elétricos à bateria, também conhecidos como puramente elétricos, são movidos por motores elétricos que recebem energia elétrica armazenada em uma bateria. Ela é recarregada através da conexão na rede elétrica ou substituindo por outra já recarregada. Os VEHs combinam os veículos anteriores com veículos convencionais movidos a motores de combustão interna (MCI), sendo que o primeiro possibilita uma maior eficiência e economia do combustível, enquanto o último fornece uma maior autonomia. As baterias destes veículos são recarregadas por frenagem regenerativa e pelo motor a combustão. Por último, os veículos elétricos híbridos *plug-in* possuem a mesma combinação dos motores elétrico e a combustão dos VEHs, entretanto a bateria pode ser recarregada na rede elétrica em adição à frenagem regenerativa e pelo motor à combustão (CHAN, 1993; BASSO, 2011).

Em termos de consumo de energia, Brinkman et al. (2005) e Williamson e Emadi (2005) provaram que VEBs e VEHs proporcionam uma economia de combustível em

relação aos veículos de combustão interna, incluindo o caso quando a energia elétrica é gerada através de recursos derivados do petróleo. Além disso, a utilização de VEBs e VEHPs levam à redução da emissão de gases do efeito estufa. Apesar de aumentar a economia de combustível, a confiabilidade global dos VEHPs é menor comparada com veículos a combustão, dado que a arquitetura dos primeiros é mais complexa do que dos últimos por incluir numerosos subsistemas (MASRUR, 2008). A Tabela 1 apresenta algumas comparações entre os VEB, VEHP e VEHP, incluindo: o tipo de motor de propulsão que possuem, a forma de armazenamento de energia e a provisão desta, os principais pontos que os diferenciam e os principais problemas enfrentados.

Por não emitir gases nocivos localmente, os veículos puramente elétricos aparecem como uma solução ideal para lidar com a crise energética e o aquecimento global. Entretanto, devido ao alto investimento inicial, baixa autonomia e longo tempo de recarga, os VEBs ainda mostram-se limitados para grande adesão comercial. Os VEHPs apresentam-se como uma opção viável para contornar as limitações anteriores, possuindo expressiva autonomia, mas emitindo poluentes em demasia. Assim, em busca de maximizar a autonomia do veículo em conjunto com a minimização de emissões poluentes, os VEHPs surgem como a melhor alternativa, sobrepondo-se aos VEHPs.

Tabela 1 – Principais comparações entre VEB, VEHP e VEHP.

Características	VEB	VEHP e VEHP
Propulsão	<ul style="list-style-type: none"> • Motores elétricos 	<ul style="list-style-type: none"> • Motores elétricos • Motores de combustão interna
Subsistema de armazenamento de energia	<ul style="list-style-type: none"> • Bateria • Supercapacitor 	<ul style="list-style-type: none"> • Bateria • Supercapacitor • Combustíveis fósseis ou alternativos
Fonte de energia e infraestrutura	<ul style="list-style-type: none"> • Pontos de recarga na rede elétrica 	<ul style="list-style-type: none"> • Postos de gasolina • Pontos de recarga na rede elétrica (para VEHP)
Principais observações	<ul style="list-style-type: none"> • Zero emissões locais • Alta eficiência energética • Independente de combustível fóssil • Autonomia relativamente curta • Alto custo inicial 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixas emissões locais • Alta economia de combustível • Dependente de combustível fóssil • Maior autonomia • Maior custo que veículos de MCI
Principais problemas	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidade de armazenamento da bateria • Pontos de recarga • Custo • Vida útil da bateria 	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidade de armazenamento da bateria • Controle, otimização e gerenciamento de diversas fontes de energia

Fonte: Adaptado de Chan, Bouscayrol e Chen (2010).

Manz et al. (2014) mostram que os Estados Unidos da América (EUA) já subsidiam a compra de VEHPs, implicando que estes estão se tornando uma alternativa economicamente competitiva com os demais tipos de veículos, com a frota crescendo consideravelmente na indústria automotiva. Ainda nos EUA, Duvall e Knipping (2007) preveem que até o ano de 2020, 35% do total da frota de veículos será composta por VEPs. No Brasil, o estudo de Baran e Legey (2010) apresenta que a frota de automóveis continuará crescendo, tornando-se a quinta maior do mundo em 2030. Eles debatem que os VEs são uma opção interessante para o setor automotivo frente aos veículos utilizados atualmente. Entretanto, devido a recessão enfrentada pelo país em 2015, esta projeção deverá ser reestudada.

Assim, aliando os benefícios e prospecções citados anteriormente, os VEHPs apresentam-se como uma nova tecnologia altamente promissora e com grande expectativa de exercer um papel fundamental nos setores elétrico e automobilístico nas próximas décadas. Entretanto, deve-se atentar para o fato de que o VEP pode atuar tanto como carga ou fonte de energia para o sistema elétrico de potência. O primeiro caso acontece quando o VEHP está recarregando suas baterias, ou seja, consumindo energia da rede. Já o segundo caso pode acontecer com o veículo comunicando-se com a rede para atuar em seu benefício, seja fornecendo energia ativa ou controlando sua taxa de recarga. A este tipo de conceito denomina-se Veículo-para-Rede ou V2G (do inglês *Vehicle-to-grid*). Nas duas seções seguintes, 2.2 e 2.3, apresentam-se os principais impactos e benefícios, respectivamente, associados aos dois conceitos mencionados.

2.2 Impacto da recarga dos VEPs

A recarga dos veículos elétricos *plug-in* é cíclica, variável e, de certa forma, imprevisível, uma vez que estes atuam como carga na rede elétrica. Se uma quantidade significativa de VEPs requisitarem energia ao mesmo tempo e uma coordenação adequada não for empregada, a recarga poderá ocorrer aleatoriamente tanto no tempo quanto no espaço. Isto pode submeter o sistema elétrico a certas complicações, principalmente em horários de pico. Esta é uma suposição muito provável de acontecer, dado que os proprietários dos VEPs poderiam chegar em casa após o trabalho e iniciarem a recarga dos veículos durante um período de alta demanda. Aliado com o fato de que os chuveiros elétricos compõem uma grande parcela da carga residencial brasileira, a coincidência da recarga com o horário de uso do chuveiro poderia alterar significativamente o perfil de carga. Ipakchi e Albuyeh (2009) discutem que um típico VEP sob recarga mais que dobra a carga média de uma residência, alterando drasticamente a curva de carga do consumidor.

Meliopoulos et al. (2009) apresentam que, se o veículo requisitar recarga em períodos indevidos e em centros urbanos congestionados, picos de consumo indesejáveis podem surgir. No caso abordado, com a adesão de apenas 3 VEHPs a carga média registrada

aumentou em mais de 30%. Outra comprovação mostrada no mesmo relatório indica que com a recarga dos 3 VEHPs a expectativa de perda de carga do transformador é 25% maior que o caso em que nenhum veículo requisita recarga. Em adição, discute-se que, se o carregador empregado para a recarga do veículo não for sofisticado o suficiente, problemas com as harmônicas injetadas na rede e o fator de potência passam a ser significativos.

O estudo realizado por Sperandio, Saldanha e Basso (2012), considerando um cenário onde a frota de veículos elétricos *plug-in* cresceria relativamente nos próximos 10 anos na região metropolitana do estado do Rio Grande do Sul, conclui que os transformadores das subestações estariam sobrecarregados durante a recarga. Além disso, em uma das simulações, violações no limite térmico de linhas de transmissão foram registradas.

Basso (2011) afirma que, caso a energia elétrica da recarga dos veículos elétricos *plug-in* seja proveniente de usinas termoelétricas convencionais no Brasil, excluindo as termoeletrônicas, a poluição decorrente da geração aumentará de acordo com o aumento na frota de veículos. Assim, o princípio de reduzir as emissões poluentes geradas pelos veículos a combustão é revertida em poluição emitida pelas usinas térmicas, caso um número muito grande de veículos comece a recarregar ao mesmo tempo sem nenhuma coordenação. No mesmo trabalho, fez-se o estudo do impacto da recarga dos VEPs no sistema de distribuição de energia elétrica, constatando, via simulações, que os transformadores apresentam situações de carregamento elevadas devido à presença dos VEPs.

Masoum, Moses e Hajforoosh (2012) também afirmam que a recarga dos VEPs sem coordenação pode aumentar a carga nos horários de ponta e ocasionar problemas locais nas redes de distribuição, bem como aumento das perdas de energia e desvios de tensão, comprometendo a qualidade da energia. Além disso, podem levar a sobrecargas nos condutores e transformadores de distribuição e redução na confiabilidade da rede elétrica. O trabalho ainda avalia o papel exercido pela coordenação da recarga na melhora da performance do transformador de distribuição em alimentadores com baixa, média e alta penetrações de VEPs.

Jiang et al. (2014) realizaram um estudo mais aprofundado considerando o horário de inserção para recarga na qualidade da energia com a inserção dos VEHPs, o tempo necessário para tal e a localização geográfica dos veículos. Em um primeiro caso de simulações, considerando uma penetração de até 30%, concluiu-se que os VEHPs da atualidade não possuem uma distorção harmônica significativa no sistema elétrico, mas que, no segundo caso, onde os carregadores dos veículos são alterados, a tensão de neutro na frequência fundamental aumentou relativamente na rede de distribuição secundária.

Diversos outros estudos em diferentes países convergiram para impactos similares. Dos resultados obtidos, destacam-se: o crescimento abrupto da carga de transformadores; desvios de tensão da ordem de 10%, considerando inclusive baixa penetração de VEPs; e crescimento da carga de pico tanto em âmbito residencial como nacional, excedendo a

capacidade atual de distribuição.

A Tabela 2 apresenta o crescimento de carga registrado para alguns dos estudos sob diferentes penetrações de VEPs (MOSES; MASOUM; HAJFOROOSH, 2012; CLEMENT-NYNS; HAESSEN; DRIESEN, 2010; VLIET et al., 2011; QIAN et al., 2011; WU et al., 2011; SUNDSTRÖM; BINDING, 2012). Para a Austrália e o Reino Unido, verificaram-se dois cenários com diferentes penetrações de VEPs, no mesmo estudo. Nos outros países, apenas um cenário foi apresentado.

Tabela 2 – Crescimento da carga de pico com a recarga sem coordenação dos VEPs em diferentes estudos.

País	Nível de penetração dos VEPs	Aumento da carga de pico
Austrália	17%	37%
	31%	74%
Bélgica	30%	56%
Países Baixos	30%	54%
Portugal	11%	14%
Reino Unido	10%	17,9%
	20%	35,8%

Fonte: Adaptado de Yilmaz e Krein (2013).

Outra consequência da recarga não coordenada de veículos elétricos verificada por Halbleib, Turner e Naber (2012), apontou um aumento na fatura de energia de até 22% para os consumidores devido ao crescimento da demanda registrada pela recarga dos veículos, mesmo sob baixa taxa de penetração. Ainda no contexto financeiro, Veldman e Verzijlbergh (2015) exploraram o impacto da recarga dos veículos elétricos nos gastos de capitais. Estes gastos eram resultantes da necessidade de reforçar a rede e também os custos das perdas de energia. Na metodologia desenvolvida, encontrou-se um aumento de 25% dos preços anteriores em comparação a um cenário sem inserção de VEs. Constatou-se que grande parte desse aumento nos custos são devidos as perdas de energia.

ElNozahy e Salama (2014) trazem uma modelagem mais realística dos impactos dos VEHPs no sistema de distribuição. Os autores assumem uma penetração heterogênea dos veículos, baseando-se na premissa de que estes estarão mais agrupados espacialmente em áreas residenciais do que em centros comerciais ou industriais. Ou seja, realizou-se o estudo dos impactos analisando a penetração dos veículos de forma distribuída, em vez de considerar o sistema elétrico como um todo. Em adição, modelou-se com mais detalhes as incertezas presentes no sistema. O referido trabalho concluiu que os transformadores da distribuição são os principais afetados, caso uma recarga não coordenada dos VEHPs seja adotada, o que já foi apresentado por outros autores.

Shafiee, Fotuhi-Firuzabad e Rastegar (2013) também discutem os impactos dos

VEHPs na carga de pico, desvio de tensão e perdas de energia totais em diferentes casos para os próximos anos, mas apresentando uma investigação mais completa, onde:

- Abrangem-se diferentes comportamentos dos usuários em dias úteis e finais de semana tanto no verão como no inverno;
- Define-se mais precisamente as características e diferentes modos de operações dos VEHPs;
- Faz-se uma previsão mais exata dos níveis de penetração dos veículos nos sistemas de distribuição e;
- Considera-se o crescimento de carga em conjunto com o aumento do número de VEHPs.

Com o referido trabalho, constatou-se que uma maior penetração de VEHPs resulta em aumentos da carga de pico, das perdas e desvio de tensão.

Através de uma abordagem probabilística, o trabalho de Giglioli et al. (2014) avaliou o impacto da recarga dos veículos elétricos na eficiência e na confiabilidade do sistema. Verificou-se que se os VEPs solicitarem recarga durante horários de ponta, algumas usinas termoeletricas de resposta rápida e com eficiência relativamente baixa são acionadas para atender o crescimento da demanda. Assim, a eficiência global do sistema de geração diminui. Em adição, a confiabilidade destas plantas de geração também são baixas, reduzindo a confiabilidade global do sistema. Caso os VEPs se recarreguem durante a noite, o cenário se inverte, com a eficiência e a confiabilidade do sistema aumentadas.

Zhang et al. (2014) discutem quantitativamente a influência do VEP atuando como carga na estabilidade transitória de tensão da rede de distribuição, utilizando o sistema de 16 barras do IEEE para os testes. Na simulação executada, obteve-se que o sistema ficou instável quando a taxa de penetração alcançou 50% e piorou com o aumento da inserção de VEPs, sendo que foram considerados motores de indução e cargas estáticas. Isso indica que quanto maior a penetração de VEPs, menor será a estabilidade transitória de tensão.

Resumidamente, a recarga dos VEPs sem a coordenação adequada pode aumentar a carga média dos consumidores, causando picos de consumo indesejáveis. Além disso, pode sobrecarregar transformadores e romper os limites térmicos das linhas de transmissão. Em adição, pode causar o despacho de usinas termoeletricas caras e altamente poluentes para atender a demanda crescente. Desvios de tensão e redução na confiabilidade e eficiência também podem surgir. Por fim, a fatura de energia elétrica pode aumentar e a estabilidade pode ser comprometida.

Porém, apesar dos impactos citados, os VEPs também podem auxiliar o sistema elétrico de potência através da aplicação de medidas eficientes para gerenciar o carrega-

mento. A seção seguinte apresenta estes benefícios sob o ponto de vista ambiental e de possíveis vantagens para o sistema elétrico.

2.3 Benefícios dos VEPs

Os veículos elétricos *plug-in* também criam oportunidades para o setor elétrico se uma estratégia de controle planejada e coordenada for aplicada. Os benefícios podem ser em termos ambientais, na prestação de serviços auxiliares e outros auxílios que não se enquadram nos anteriores. As três subseções seguintes apresentam, respectivamente, estes benefícios de acordo com a literatura.

2.3.1 Vantagens em termos ambientais

As emissões de CO₂ podem cair drasticamente se os VEPs substituirmos os veículos movidos à combustão interna convencionais (JOURABCHI, 2008). Além disso, os VEPs podem reduzir diretamente a emissão de gases do efeito estufa. A análise feita por Ramteen e Denholm (2009) permite concluir que o VEHP pode reduzir as emissões poluentes relacionadas à indústria automotiva e adotando o conceito V2G, estas reduções podem ser muito mais significativas. Boa parte dessa diminuição é ditada pelas condições em que o veículo será recarregado, dado que as emissões podem não ser expressivamente reduzidas caso sejam utilizadas fontes de geração de energia elétrica poluentes.

O relatório elaborado por Duvall e Knipping (2007) comprovou que, em cenários de baixa, média e alta penetração de VEPs, uma significativa redução dos gases do efeito estufa pode ser alcançada, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis na indústria automotiva. Samaras e Meisterling (2008) obtiveram uma redução de 32% dos gases do efeito estufa com a inclusão dos VEHPs em relação aos convencionais. Entretanto, eles citam que, caso a geração de energia elétrica não seja derivada de uma fonte com baixo índice de poluição, essa redução passa a ser pequena.

Os veículos elétricos *plug-in* apresentam benefícios em termos de emissões sobre os VEHs e veículos convencionais, mesmo contabilizando as emissões decorrentes da geração de energia elétrica, como apontado por alguns estudos. Em Kintner-Meyer, Schneider e Pratt (2007), projetam-se reduções de 27% dos gases do efeito estufa e 31% dos óxidos de nitrogênio. Conforme apontado por Stephan e Sullivan (2008), os VEPs reduzem as emissões de CO₂ comparados com os veículos híbridos em 25% a curto prazo e até 50% a longo prazo, utilizando uma matriz energética diversificada. Em outro trabalho, a redução calculada foi de mais de 32% a curto prazo e 25% a longo prazo, comparando com veículos de motores à combustão interna (AXSEN; KURANI, 2010).

Fica evidente que a adoção dos veículos elétricos *plug-in* irá reduzir significativamente a emissão de poluentes na atmosfera em relação aos veículos tradicionais movidos à

combustíveis fósseis. Entretanto, deve-se ter cuidado quando comparando com a redução das emissões globais, que incluem a poluição gerada pelas usinas de energia elétrica acionadas para atender a demanda. Neste caso, a diminuição pode não ser tão significativa e até pior em alguns cenários, como visto na Seção 2.2. Aliados a estas reduções, os VEPs também podem beneficiar o sistema elétrico através da prestação de serviços auxiliares, como será visto na próxima subseção.

2.3.2 Serviços auxiliares

Em sistemas elétricos de potência, os serviços auxiliares são os serviços necessários para manter a confiabilidade do sistema, manter o equilíbrio entre oferta e demanda e auxiliar a operação. Entre esses serviços, destacam-se o controle de frequência, o controle de tensão, a reserva circulante, o nivelamento da carga de pico, o auxílio na partida de geradores de emergência (*black start*), o suporte para energia reativa e a compensação de perdas ativas.

Os veículos elétricos *plug-in* combinados no conceito V2G podem atuar em benefício da rede elétrica através da prestação de diferentes serviços auxiliares. Entretanto, uma única unidade de veículo elétrico possui capacidade limitada para representar um benefício expressivo para a rede. Assim, os VEPs são normalmente agrupados em frotas ou, como Guille e Gross (2009) definem e explicam, em agregadores.

O agregador é uma entidade que reúne vários VEPs para gerar um impacto expressivo, benéfico e efetivo na rede elétrica, atuando como uma interface entre o operador do sistema e a frota de veículos conectada, possibilitando a participação dos veículos no mercado elétrico. Ele se comporta como um tomador de decisões, possuindo uma estratégia otimizada em seu funcionamento para efetivamente atuar como geração/armazenamento, capaz de fornecer serviços auxiliares para a rede ou de atuar como uma carga controlável para ser recarregada de maneira mais benéfica para o sistema.

O esquema básico de comunicação entre o agregador e o sistema elétrico de potência é ilustrado na Figura 1, onde a energia elétrica flui em um único sentido das usinas geradoras para os consumidores. Entre os VEPs e o agregador, o fluxo de energia é bidirecional, sendo que o último possui controle sobre a taxa de recarga ou descarga do primeiro. Os serviços auxiliares necessários para a rede e que possam ser executados pela frota de VEPs são solicitados remotamente pelo operador do sistema, configurando o fluxo de energia e comunicação em ambas direções.

O conceito V2G é considerado uma alternativa muito promissora para realizar regulação de frequência e de tensão. Isso se dá devido ao fato de que os VEPs podem responder rapidamente alterando suas taxas de recarga e descarga. Assim, eles possuem um maior valor de mercado quando atuando nos serviços de regulação, retornando lucros

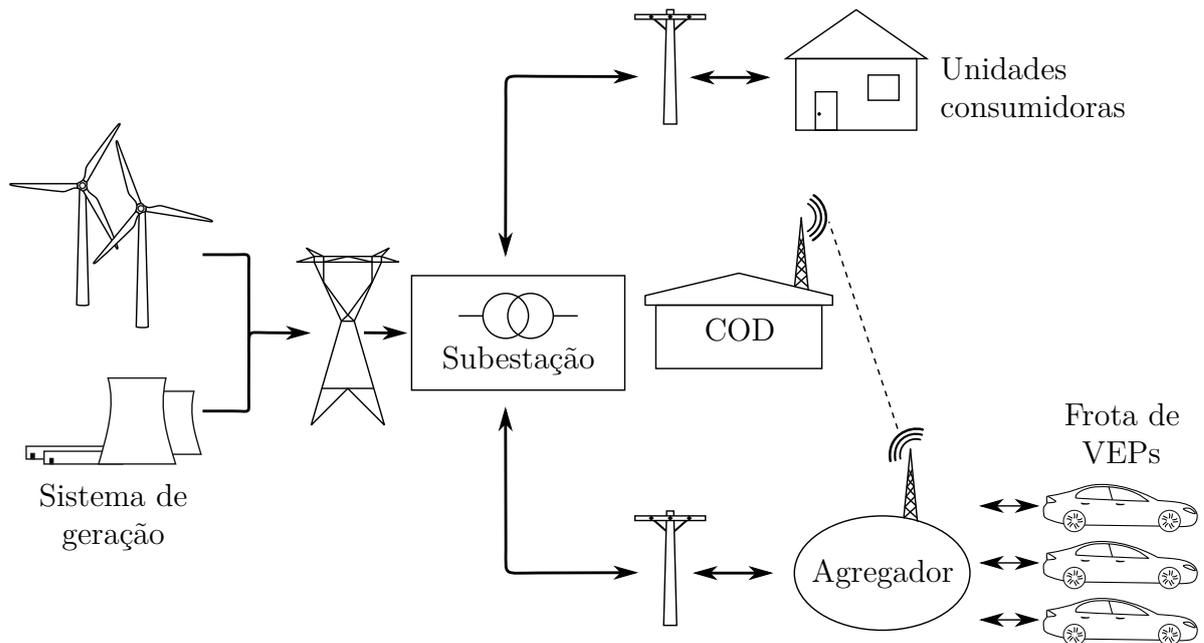


Figura 1 – Esquema ilustrativo da comunicação entre o agregador e o sistema elétrico de potência.

Fonte: Adaptado de Tomić e Kempton (2007).

mais elevados (De Los Ríos et al., 2012; TOMIĆ; KEMPTON, 2007).

A regulação de frequência é utilizada para balancear a oferta e demanda de energia ativa e a regulação de tensão é utilizada para equilibrar a oferta e demanda de energia reativa. Kempton e Tomić (2005a) apontam que ambas as regulações são economicamente viáveis quando utilizado VEs, retornando um lucro líquido de \$2554 dólares por ano para cada veículo fornecendo regulação. Consideraram-se os gastos da compra da energia, custos relacionados ao desgaste da bateria pelo seu uso adicional nos ciclos de carga e descarga, custo associado aos equipamentos extras necessários para o controle da recarga, receita pela capacidade disponibilizada e rendimento proveniente da energia despachada pelo veículo.

O trabalho de De Los Ríos et al. (2012) calculou um lucro entre \$1250 e \$1400 dólares por ano para cada VEHP atuando na regulação de tensão e frequência. Isto indicou uma redução de 9 a 11% no custo da aquisição do veículo pelo proprietário. No modelo utilizado, incluíram-se custos de capital, custos da infraestrutura e custo operacional. Esta última categoria foi subdividida em nove outras, incluindo o preço da eletricidade, bateria, controlador, carregador, manutenção, entre outros. Em recebimentos, contabilizaram-se as entradas referentes a capacidade de energia disponibilizada pelo VEHP e o preço do serviço de regulação executado (energia fornecida).

Wu et al. (2012) apresentam a análise da estabilidade transitória de um sistema elétrico sob diferentes faltas. Os autores comprovaram que ela é melhorada através da

aplicação do controle da recarga e descarga de VEHPs. Em conjunto, também utilizaram-se dispositivos de armazenamento de energia elétrica por supercondução (SMES, do inglês *Superconducting Magnetic Energy Storage*). O trabalho integra uma estratégia de controle no agregador para realizar a recarga e descarga dos VEPs de forma inteligente, fornecendo ou recebendo energia conforme a necessidade da rede.

Dois outros serviços auxiliares são utilizados por Wang e Wang (2013): *peak shaving* e *valley filling*, em tradução livre, corte do pico e preenchimento de vale, respectivamente. Ambos os conceitos servem para equilibrar a oferta e a demanda de energia elétrica. O primeiro, corta picos de carga durante períodos críticos pelo controle da taxa de recarga ou pela descarga de energia. Já o segundo, consiste em recarregar o veículo durante horários fora de pico. Ou seja, a utilização de ambos serviços busca suavizar a curva de carga a fim de reduzir os picos durante horários de alta demanda e preencher os vales durante horários de baixa demanda.

Além da regulação citada, Sortomme e El-Sharkawi (2012) também consideram a prestação de serviços de reserva circulante, criando um algoritmo, que através de simulações em um sistema real, oferece benefícios financeiros aos proprietários dos VEPs envolvidos no esquema. Além disso, foram calculadas as taxas de recarga e descarga dos VEPs para os devidos auxílios solicitados pelo operador do sistema.

Outros quatro serviços auxiliares que podem ser fornecidos por VEPs para redes de distribuição são investigados por Rautiainen et al. (2013), sendo estes: gerenciamento da carga de pico, gerenciamento do fluxo de potência, energia de reserva e melhoria da qualidade de energia. O primeiro caso considera o controle da taxa de recarga e descarga para suavizar a curva de carga. No segundo, utilizam-se os veículos para otimizar o fluxo de potência para atender um determinado objetivo, como reduzir perdas na linha. Ainda, considerou-se utilizar os VEPs como uma fonte de reserva para evitar interrupções. Por fim, procurou-se melhorar a qualidade da energia através da mitigação de quedas de tensão, harmônicas, *flicker* e assimetria.

Aliado aos benefícios anteriores, o trabalho de Gao et al. (2012) propõe um mecanismo baseado em contrato, o qual visa incentivar a participação dos VEs nos serviços auxiliares. Consideram-se as necessidades individuais de cada veículo e um mecanismo de contrato otimizado. Este último, estimula a participação de cada VE através de termos que maximizem os benefícios para cada unidade.

Resumidamente, os veículos elétricos *plug-in*, através do conceito V2G, podem fornecer os serviços auxiliares de regulação de frequência e tensão, sendo estes provados como economicamente viáveis. Além disso, também podem ser utilizados para melhorar a estabilidade transitória, gerenciar a carga de pico, preencher os vales do perfil de consumo, se disponibilizar como reserva circulante, gerenciar o fluxo de potência de maneira otimizada e melhorar a qualidade da energia elétrica. Mas, para que possam participar no mercado e

providenciar serviços de forma significativa, os veículos são usualmente concentrados em agregadores, os quais atuam como interface entre a frota e o operador do sistema.

Em adição aos benefícios já comentados, a próxima subseção apresenta um tópico sob atual e constante estudo na literatura sobre a utilização dos veículos elétricos para suportar a entrada de fontes renováveis de energia elétrica e outros benefícios que não são considerados como serviços auxiliares.

2.3.3 Outros benefícios

No trabalho de Ilić, Karnouskos e Beigl (2015) apresenta-se que a utilização da frota de VEs pode aumentar a precisão da previsão da demanda consideravelmente. Neste trabalho, a frota de veículos atua como um sistema de armazenamento de energia variável, absorvendo os erros de previsão e, conseqüentemente, reduzindo o custo a ser pago por eles. Considera-se que o armazenamento variável é mais barato do que o armazenamento de energia estático e que o mesmo leva a uma diminuição significativa nos erros de previsão. Em contrapartida, este benefício só é atingido a partir de um determinado nível de penetração de VEs.

Vithayasrichareon, Mills e MacGill (2015) mostram que, aliando a recarga dos VEs com a geração de energia solar fotovoltaica, pode-se maximizar os benefícios e minimizar os custos com grandes penetrações das duas tecnologias no setor elétrico, reduzindo as emissões decorrentes da recarga dos VEs em horários de ponta. O trabalho conclui que quanto maior o nível de penetração dos VEs se recarregando, maior a importância da energia solar fotovoltaica.

Denholm, Kuss e Margolis (2013) apontam que a geração fotovoltaica em conjunto com os VEHPs, ambos em grande escala no sistema, possuem benefícios mútuos. O primeiro fornece energia elétrica durante os picos do meio-dia no verão, mitigando a necessidade por capacidade de geração adicional. O segundo, absorve a energia da geração fotovoltaica que seria desperdiçada devido à baixa demanda na primavera.

No trabalho de Kempton e Tomić (2005b) avalia-se o potencial do conceito V2G para auxiliar a característica intermitente das fontes renováveis solar e eólica, assumindo grandes penetrações de geração. Para o caso solar, armazena-se a energia gerada durante o pico de incidência solar para liberar depois no pico de carga. Já a energia eólica alia-se com os VEs para providenciar serviços de regulação e reserva operacional. A segunda característica também é analisada por Wang et al. (2011), onde é proposto um novo modelo de integração entre a energia eólica e resposta à demanda para reduzir o custo total operacional do sistema.

Tem-se então que o conceito V2G aumenta a flexibilidade da rede para melhor aproveitar os recursos de energia renovável intermitentes, podendo também atuar no

aumento da precisão da previsão de demanda como uma fonte variável de armazenamento.

Os benefícios dos VEPs para o sistema elétrico foram extensivamente provados por estudos e apresentados nestas três últimas subseções. Entretanto, alguns desafios ainda se impõem para que os benefícios sejam totalmente aproveitados. A seguir, alguns desses desafios que impedem a difusão dos VEPs e do conceito V2G são apresentados.

2.4 Desafios do conceito V2G

Apesar dos diversos benefícios resultantes da aplicação dos VEPs no conceito V2G, alguns impedimentos e barreiras ainda dificultam sua implementação, como apresentado a seguir.

Em termos da bateria dos veículos, sua utilização para fornecer serviços auxiliares irá reduzir sua vida útil devido aos ciclos extras de carga e descarga. Estimar um custo relacionado a sua degradação é uma característica interessante para incorporar no cálculo da viabilidade econômica, mas é uma tarefa complexa, dado o fato de que as tecnologias ainda estão em desenvolvimento. Guille e Gross (2009) afirmam que através de controle inteligente, tempo de recarga e fluxo de energia otimizados é possível minimizar a taxa de degradação adicional da bateria devido aos serviços auxiliares. Mas ainda assim, existe uma barreira muito grande para atingir este controle inteligente.

Deve-se assegurar a comunicação segura entre o agregador, um grande número de VEPs e o operador do sistema, devendo existir uma infraestrutura bidirecional confiável. Além disso, sensores e medição inteligentes deverão ser implantados. A crescente demanda de energia para recarga poderá exigir, em alguns casos, ampliação da capacidade de geração, como citado anteriormente, uma vez que a recarga dos VEPs pode ocasionar impacto considerável nos equipamentos da distribuição, sobrecarregando-os. Todos esses pontos, convergem para a necessidade de investimentos significativos no sistema elétrico para atender as mudanças.

Outros desafios que impedem a difusão dos VEPs comumente apresentados são: o alto custo do investimento inicial comparado com os veículos convencionais, a baixa autonomia, a resistência que os setores automotivo e de petróleo podem oferecer, além da aceitação dos consumidores a esta nova tecnologia.

Tuttle e Baldick (2012) afirmam que devido a estes desafios o conceito V2G pode levar mais de 10 anos para ser atingido em quantidade significativa. No Brasil, a indústria automotiva passa por dificuldades devido a crise econômica de 2015, não correspondendo com as estimativas iniciais de crescimento, onde se incluem o crescimento esperado da frota de VEs, que ainda é muito pequeno. Logo, não tem-se uma penetração considerável de VEs no setor.

3 ESTRATÉGIAS E MÉTODOS PARA RE-CARGAS

A recarga dos veículos elétricos *plug-in* pode ser descoordenada ou coordenada. Na recarga descoordenada não existe nenhum controle sobre a taxa de recarga dos veículos elétricos. Os mesmos começam a se recarregar imediatamente quando plugados ou após um tempo pré-determinado e apenas cessam a recarga quando a bateria está totalmente preenchida ou o veículo é desconectado da rede. Já a recarga coordenada aplica algum tipo de estratégia que controla a recarga dos VEPs.

O controle da recarga coordenada pode ser feito apenas para limitar ou estabelecer a taxa de recarga do VEP ou através da injeção de potência ativa. O primeiro caso caracteriza-se por fluxo de potência unidirecional (da rede para o veículo), e o segundo caso caracteriza-se por fluxo bidirecional (da rede para o veículo e do veículo para a rede). É através da recarga coordenada que os impactos e os benefícios do capítulo anterior podem ser mitigados e aproveitados, respectivamente.

O fluxo de potência unidirecional é utilizado apenas para recarregar a bateria do VEP, possuindo um baixo custo para implementação. Neste sentido, a bateria não apresenta nenhuma degradação extra devido a não se descarregar suprindo energia para a rede. Para este tipo de fluxo, apenas uma conexão elétrica na rede é necessária. Dentre os principais benefícios, destacam-se a possibilidade de se aplicar um controle simples para a coordenação, o que propicia a mitigação dos impactos na rede, alcançado através da limitação da taxa de recarga.

O fluxo de potência bidirecional envolve mais custos que o anterior, mas pode ser utilizado tanto para controlar a recarga como para suprir energia para a rede caso necessário. Em contrapartida, devido aos ciclos de descarga, a bateria sofre degradação extra. Como requisitos para implantação, necessita-se também de comunicação bidirecional e medição inteligente. Com isso, este tipo de fluxo de potência permite prestar serviços auxiliares para a rede e apoio para entrada de fontes renováveis. A Tabela 3 relaciona alguns pontos de comparação entre os fluxos de potência unidirecional e bidirecional.

As estratégias de recarga coordenada podem ser descentralizadas ou centralizadas. Na recarga descentralizada ou distribuída, o proprietário do VEP decide quando irá recarregar a bateria. Já na recarga centralizada, uma entidade central reúne informações sobre a rede, carga e geração, estando apta para decidir e controlar a recarga ou descarga de um conjunto de VEPs. Conforme exposto por Waraich et al. (2013), ainda não é claro qual das duas abordagens implica em uma rede elétrica mais robusta e elas também podem

Tabela 3 – Comparação entre fluxos de potência unidirecional e bidirecional.

	Fluxo de potência unidirecional	Fluxo de potência bidirecional
Fluxo de potência	<ul style="list-style-type: none"> • Fluxo de energia elétrica em uma direção • Apenas recarga da bateria 	<ul style="list-style-type: none"> • Fluxo de energia elétrica em duas direções • Recarga e descarga da bateria
Custo	<ul style="list-style-type: none"> • Baixo 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto
Efeito na bateria	<ul style="list-style-type: none"> • Nenhuma degradação extra 	<ul style="list-style-type: none"> • Degradação extra da bateria devido à descarga
Sistema elétrico de distribuição	<ul style="list-style-type: none"> • Não precisa de investimento e modernização 	<ul style="list-style-type: none"> • Necessita investimento e modernização
Requisitos e desafios	<ul style="list-style-type: none"> • Conexão de energia na rede elétrica 	<ul style="list-style-type: none"> • Comunicação e conexão bidirecional de energia • Sensores e medição inteligente adequados • Troca de informação considerável • Custo e investimento extras • Perdas de energia • Stress dos dispositivos
Benefícios	<ul style="list-style-type: none"> • Simplifica problemas de interconexão • Controle simples e gerenciamento fácil • Fornece serviços baseados na potência reativa e ajuste dinâmico das taxas de recarga, mesmo sem fluxo inverso • Supre ou absorve energia reativa, sem ter que descarregar a bateria, através do controle de fase e ângulo da corrente 	<ul style="list-style-type: none"> • Serviços auxiliares • Regulação da potência ativa e estabilização de frequência e tensão • Reservas circulantes • Suporte para energia reativa • Corte de pico • Preenchimento de vale • Balanço de energia • Filtragem de harmônicas • Apoio para entrada de fontes renováveis

Fonte: Adaptado de Yilmaz e Krein (2013).

ser combinadas em uma única estratégia.

Diversos métodos para recarga coordenada e descoordenada dos veículos elétricos *plug-in* foram propostos na literatura, sendo que uma atenção maior foi dada ao primeiro pois os benefícios que podem surgir são amplos. Estes métodos são baseados em certas suposições em relação à infraestrutura disponível, taxas e duração da recarga, status da bateria, tamanho, tecnologia e capacidade de energia, tipo do VEP e abordagens matemáticas. Alguns deles são expostos nas duas seções seguintes, separadas em recarga descoordenada e coordenada, respetivamente.

3.1 Recarga descoordenada

As estratégias para recarga descoordenada são escassas dados os fatos de que não resultam em benefícios expressivos para a rede. Elas são diretamente ditadas pelos usuários, não sendo possível realizar uma coordenação e controle para atuar a favor do sistema

elétrico de potência.

A primeira estratégia de recarga descoordenada acontece quando os VEPs começam a se recarregar imediatamente quando conectados ou após um certo tempo de atraso ajustado pelo proprietário. No primeiro caso, o usuário não possui incentivo ou informações necessárias para realizar uma recarga inteligente a favor do sistema elétrico. Já no segundo caso, ele possui informações e o tempo de atraso possibilita que o carregamento aconteça em períodos fora do pico. Esta estratégia acontece com frequência, pois os usuários chegam em casa após o trabalho e conectam os veículos para recarga para que a bateria esteja carregada no dia seguinte (CLEMENT-NYNS; HAESSEN; DRIESEN, 2010).

Ainda de forma descoordenada, mas com um incentivo para os donos dos VEPs tomarem iniciativa, é comum a utilização de duas tarifas de energia elétrica. Aplica-se uma mais cara durante os períodos de pico e uma mais barata fora do pico. Com isso, assume-se que os usuários da tarifa dupla irão recarregar os veículos durante os períodos de baixa demanda onde o valor a ser pago pela energia é menor.

Ressalta-se que neste tipo de estratégia de recarga não existe um controle da taxa de recarga e muito menos o fluxo de energia do veículo para a rede. A minimização dos impactos é possível de ser realizada através do incentivo de recarregar os VEPs fora do pico, aplicando tarifas de energia diferenciadas. A recarga coordenada é a solução para este problema e a próxima seção apresenta algumas das estratégias, métodos e abordagens disponíveis na literatura.

3.2 Recarga coordenada

As pesquisas em métodos e estratégias de recarga coordenada visando o benefício do sistema elétrico cresceram expressivamente nos últimos anos, cada qual considerando diferentes abordagens com diversificadas suposições. Algumas das alternativas mais relevantes são apresentadas a seguir, separadas em duas subseções. Na primeira, apenas o fluxo de potência unidirecional é considerado e, na segunda, o fluxo bidirecional é levado em consideração.

3.2.1 Fluxo de potência unidirecional

O trabalho de Clement-Nyngs, Haesen e Driesen (2010) busca otimizar a recarga de VEHPs e a utilização da rede elétrica visando minimizar as perdas de energia. Para solucionar este problema, os autores implementam e comparam duas técnicas de otimização: programação quadrática (QP) e programação dinâmica (DP). Os autores concluem que a diferença entre seus resultados é desprezível, sendo que a técnica QP retorna valores mais precisos e é computacionalmente mais rápida. Entretanto, na metodologia desenvolvida, a

participação do proprietário do veículo fica limitada em apenas definir o horário o qual este deseja que a bateria esteja totalmente carregada.

Han, Han e Sezaki (2010) apresentam um algoritmo de coordenação da recarga de VEHPs a ser aplicado no agregador para regulação de frequência. O problema de otimização criado é resolvido por programação dinâmica, atribuindo como função objetivo a maximização do lucro do agregador. Os autores encontram que o lucro é maximizado quando a taxa de recarga é máxima, sendo que a metodologia determina a sequência de controle para simplesmente recarregar ou não o veículo. Esta abordagem toma como referência o lucro da frota de veículos. Logo, caso a receita das unidades de VEPs deva ser considerada, a metodologia deve ser reestruturada.

Um algoritmo para regulação com fluxo de potência unidirecional é desenvolvido por Sortomme e El-Sharkawi (2011). Nele, a taxa de recarga é definida com base em um algoritmo heurístico e um de seleção otimizado. A recarga inteligente com a heurística é desenvolvida com base no preço, na carga e na máxima regulação que pode ser obtida. Já na seleção otimizada, procura-se maximizar o lucro do agregador através da maximização da regulação prestada. Como ponto negativo, destaca-se que a metodologia não incorpora os limites reais da rede de distribuição, podendo encontrar soluções inteligentes mas não aplicáveis em casos práticos.

Qian et al. (2011) apresentam uma estratégia de controle da recarga considerando o preço da energia em tempo real para determinar o tempo mais econômico para começar a recarregar a bateria. Entretanto, a eficiência do método é testada apenas na suposição de uma distribuição Gaussiana do tempo inicial da recarga, baseada em dados de tráfego e tarifa de energia única, limitando o método. No referido trabalho, a otimização e as restrições são tratadas como um problema de programação linear.

Papadopoulos et al. (2013) demonstram uma hierarquia de agentes para atuar na coordenação da recarga dos VEs divididos em três camadas: operador do sistema de distribuição, agregador e unidade do veículo. O grande diferencial desse trabalho é considerar dois modos de operação da rede, sendo uma em condição normal e outro em condição de emergência. Além disso, duas entidades são incluídas: operador do sistema de distribuição e o fornecedor de energia. Dentre os aspectos não considerados pelos autores, destaca-se a não utilização de algum método de previsão de carga dos VEs para facilitar a participação do agregador no mercado.

A técnica de otimização por sistemas artificiais imunes (AIS) foi aplicado por Oliveira, De Souza e Delboni (2013), buscando otimizar a recarga através da priorização de manter as tensões nas barras dentro dos limites e sem nenhuma sobrecarga na rede. A metodologia considera a instalação de capacitores, caso seja necessário ajustar os níveis de tensão. A aplicação desenvolvida não pode ser utilizada em casos reais por não incorporar diversas variáveis importantes, como por exemplo, os custos associados a

recarga e a instalação dos capacitores. Nesse sentido, uma metodologia mais robusta deve ser desenvolvida.

Rajabi e Esmaili (2014) apresentam um método para a recarga dinâmica otimizada, onde não existem informações sobre o cronograma de carregamento dos VEPs. O problema é formulado como programação não-linear tendo como objetivo minimizar as perdas de energia. Os autores buscam obter uma solução ótima global, incluindo algumas restrições da rede como limites térmicos e qualidade da tensão. A maior contribuição do trabalho é realizar todo o expressado anteriormente de forma computacionalmente rápida para que a aplicação possa ser executada em tempo real. O método desenvolvido calcula tensões nos nós e perdas de energia utilizando fluxo de potência de forma eficiente. Entretanto, os autores garantem a eficiência do método para um sistema de 31 barras, mas o fluxo de potência pode se tornar um problema, em termos de tempo de execução, caso o sistema a ser utilizado seja maior.

Duas metodologias para coordenar o carregamento dos VEs são propostas por Soares, Almeida e Lopes (2014), sendo uma nos agregadores e outra no operador do sistema de distribuição. A primeira visa minimizar o desvio entre a energia comprada no mercado e a energia consumida pelos VEs e, a segunda, busca gerenciar a rede e resolver os problemas operacionais que podem surgir através do controle da recarga dos VEs. A metodologia é considerada pelos autores como quase em tempo real e leva em conta as restrições da rede, períodos que veículos estão recarregando, requisitos dos donos dos veículos e requisitos operacionais dos mercados de eletricidade. Para as simulações, os padrões de viagens dos veículos e os requisitos de recarga são definidos com o algoritmo da cadeia de Markov. O trabalho não realiza uma conexão entre as duas metodologias criadas em busca de otimizar ambas as interfaces e o conceito V2G não é incorporado.

Em Ahmad e Othman (2014), a programação evolucionária é utilizada para otimizar a taxa de recarga e o estado de carga da bateria, minimizando o custo da recarga. Três métodos de recarga são desenvolvidos baseados no preço, na carga e no estado de carga da bateria. O custo da recarga utilizado na metodologia é calculado com base no preço da energia elétrica em tempo real. Os resultados encontrados pelos autores são encorajadores, onde verifica-se uma taxa de recarga maior durante períodos de baixa demanda e/ou baixo preço. Entretanto, uma estratégia otimizada de recarga não é encontrada, dado que o estado de carga final de algumas baterias pode não ser atingido dependendo do caso sob estudo.

No trabalho de Hu et al. (2014) um método para recarga coordenada visando prevenir a congestão da rede de distribuição é proposto. Três agentes são conceituados no trabalho: o operador do sistema de distribuição, o proprietário do veículo e o operador do agregador. Os requisitos do usuário, o custo da recarga e os limites térmicos dos cabos e transformadores são considerados. A programação linear é utilizada para modelar e

otimizar o processo de recarga dos VEs. A congestão no nível da distribuição é tratada com base no preço da energia, onde uma estrutura de mercado teórica é apresentada para atender as vontades dos usuários. Para a eficiência da metodologia, a comunicação entre as três interfaces deve ser extensiva, fato que não será facilmente alcançado na rede atual.

Ansari et al. (2015) propõe uma metodologia para maximizar o lucro do agregador através da oferta ótima de serviços auxiliares, neste caso, regulação e reservas circulantes, considerando diferentes mercados sob diversas incertezas. As incertezas são eficientemente incorporadas no método de programação linear através da utilização de conjuntos fuzzy, tornando a técnica aplicada como a programação linear fuzzy (FLP). A formulação empregada aumenta o lucro do agregador e também resulta em uma limitação no crescimento da carga de pico, dado que grande parte dos veículos se recarregam fora do pico. Em oposição aos benefícios encontrados, um despacho otimizado dos VEs não é atingido, resultando em algumas baterias pouco recarregadas durante o processo.

Hajforoosh, Masoum e Islam (2015) procuram maximizar a energia entregue aos VEPs e minimizar os custos associados com a geração e as perdas na linha. Os autores utilizam dois algoritmos, comparando-os entre si, para resolver o problema: otimização por enxame de partículas discreta fuzzy (FDPSO), onde funções de aptidão fuzzy aumentam a qualidade da otimização por enxame de partículas discreta (DPSO) e; algoritmo genético fuzzy. As duas técnicas apresentam resultados similares, mas a primeira baseada em DPSO possui tempo de resposta mais rápido, sendo mais adequado para aplicação em tempo real. O trabalho também utiliza um sistema especialista fuzzy para simular o perfil diário de carga e reduzir ainda mais o custo da geração. Entretanto, a metodologia considera uma taxa de recarga constante para cada VEP e não considera as preferências dos consumidores, como o tempo final da recarga.

Masoum et al. (2015) propõe um algoritmo para coordenação da recarga dos VEPs em tempo real baseado na lógica fuzzy. O trabalho visa reduzir o custo total da geração de energia elétrica e as perdas na rede, enquanto mantém a demanda máxima e tensão nos nós dentro dos limites adequados. A proposta considera uma inserção aleatória dos VEPs, levando em conta preços da energia variantes nos mercados de eletricidade e períodos de recarga preferíveis pelos consumidores. O método implantado melhora a performance e confiabilidade da rede, mas retira qualquer controle da mão dos consumidores, automaticamente coordenando os VEPs. O problema é enfrentado com uma abordagem não linear de minimização de custo e a lógica fuzzy é utilizada para incorporar as restrições da coordenação e para selecionar os VEPs mais adequados para a recarga. Como vantagem, a metodologia não necessita das previsões de carga decorrente da inserção dos VEPs e da geração distribuída, dado que as informações são repassadas em tempo real para coordenação.

Pensando no problema que diversas pesquisas apenas calculam a taxa de recarga sem

se preocupar que altos valores podem resultar em expressivas degradações das baterias, Zou e Liu (2015) apresentam uma estratégia para recarga coordenada de VEPs considerando o custo associado a degradação dos sistemas de armazenamento. Os autores afirmam ser inviável o controle centralizado da recarga, propondo um método descentralizado para que cada unidade de VEP defina seu perfil de recarga baseado em um preço comum. Assim, cada um define autonomamente a melhor estratégia de recarga para si, fazendo um *tradeoff* entre o custo total da geração e o custo acumulado da degradação da bateria. O trabalho não encontra uma solução global ótima de coordenação, dado que as taxas de recargas são calculadas para cada veículo. Em adição, este tipo de abordagem descentralizada inviabiliza a aplicação do conceito V2G para fornecer serviços em benefício do SEP, sendo útil, neste caso, para minimizar a degradação da bateria.

Outras pesquisas relevantes também buscam pontos ótimos de operação da recarga dos VEPs sob diferentes perspectivas. Jian et al. (2013) e Gan, Topcu e Low (2013) apresentam métodos para controle da recarga que suaviza a curva de carga do sistema. O primeiro resolve o problema de otimização com programação quadrática e o segundo apresenta um algoritmo com abordagem descentralizada e iterativa baseado em uma formulação própria. Geng, Mills e Sun (2013) propõem um agregador dinâmico que é otimizado pelo princípio mínimo de Pontryagin visando minimizar o custo virtual da recarga. A abordagem de Vandael et al. (2013) para gerenciamento da demanda dos VEHPs é dividida em três etapas: agregar, otimizar e controlar, onde busca-se reduzir o custo total da geração de energia. A programação dinâmica é utilizada na etapa de otimização. Jin, Tang e Ghosh (2013a) buscam resolver o problema da recarga otimizada dando mais atenção para os consumidores, onde consideram-se suas demandas e custos. Os autores resolvem o problema com a técnica de programação linear em cenários estáticos e com algoritmos heurísticos para cenários dinâmicos. Jin, Tang e Ghosh (2013b) apresentam um modelo de programação linear inteira mista e um algoritmo heurístico de tempo polinomial baseado no arredondamento da programação linear para encontrar soluções otimizadas. O trabalho foca na recarga coordenada pela perspectiva do mercado de energia, considerando que os VEs prestam serviços auxiliares para a rede.

3.2.2 Fluxo de potência bidirecional

Weihao et al. (2013) propõem uma integração entre os VEPs em um sistema elétrico de potência com alta penetração de energia eólica, como a Dinamarca, empregando o método de otimização da programação quadrática sequencial. O objetivo do trabalho é operar otimamente a recarga ou descarga da bateria dos VEPs de forma a minimizar os custos da energia para os consumidores. Em adição, o método também fornece serviços de regulação de potência para a rede, mas é considerado como computacionalmente complexo e custoso.

Ortega-Vazquez (2014) também apresenta uma estratégia de coordenação da recarga ótima incluindo a degradação da bateria, mas em oposição a Zou e Liu (2015) considera a injeção de energia pelo veículo. Em adição, o autor adiciona na metodologia um esquema de incerteza de preços em tempo real. De forma geral, obtém-se que caso a bateria tenha um custo baixo, a injeção de potência ativa para a rede pelo VE é viável. Caso contrário, a prestação de serviços auxiliares não é economicamente justificável, devendo o veículo apenas se recarregar para as viagens.

Ghofrani, Arabali e Ghayekhloo (2014) propõem uma estratégia otimizada de controle da recarga e descarga dos VEs para melhorar a previsibilidade da geração fotovoltaica, ou seja, reduzir as incertezas atreladas a previsão. No método, a geração fotovoltaica é predita pelo modelo auto-regressivo de médias móveis (discussão). Os VEs com comportamentos semelhantes são agrupados utilizando o processo de separação fuzzy C-means. E as incertezas da geração fotovoltaica e da natureza estocástica dos veículos são incorporadas pela técnica de simulação de Monte Carlo. Um algoritmo de otimização por enxame de partículas é desenvolvido para utilizar otimamente a capacidade dos VEs e minimizar a penalidade de custo dos desbalanço entre a energia prevista e a gerada. O método proposto fornece um esquema coordenado de recarga e descarga para aproveitar ao máximo o potencial da prestação de serviço dos veículos e aumentar os lucros da geração fotovoltaica e para os donos de VEs.

Shaaban et al. (2014) apresenta um método dinâmico para coordenação em tempo real da recarga e descarga dos VEPs. A metodologia busca maximizar a satisfação dos donos dos veículos e minimizar os custos operacionais do sistema, enquanto respeitando as restrições da rede. Um modelo de previsão da demanda de energia dos VEPs, considerando a frota atual e histórico de chegadas e partidas também é proposto. A otimização do problema é dividida em dois estágios que garantem a eficácia da coordenação. O primeiro estágio busca otimizar a entrega de energia enquanto considerando os limites da rede e requisitos dos consumidores. No segundo estágio, busca-se utilizar as fontes de energia eficientemente e ao mesmo tempo minimizar os custos operacionais do sistema. De acordo com os autores, as operações de recarga e descarga da bateria se mostram mais eficazes do que simplesmente recarregar. Entretanto, nenhum outro detalhe técnico decorrente desta utilização é incorporado no método, como o custo associado a degradação das baterias, o que pode reduzir a viabilidade do modelo.

Um modelo de otimização robusto é proposto por Bai e Qiao (2015) para a coordenação do despacho bidirecional otimizado de VEPs. Como objetivo do método proposto, busca-se minimizar o custo total de geradores térmicos e dos agregadores de VEPs envolvidos na operação em um dado período de despacho. A modelagem de otimização robusta apresentada pelos autores foi aplicada em busca de resolver as incertezas dos parâmetros estocásticos dos VEPs. Antes, os mesmos utilizavam programação determinística,

sendo agora formulada como programação quadrática inteira mista. Em contrapartida, a abordagem é computacionalmente exigente e apenas considera o despacho de usinas termelétricas.

O trabalho de Haddadian et al. (2015) coordena o despacho das usinas termelétricas convencionais e das frotas de VEs considerando o conceito V2G. Como objetivo principal da otimização, busca-se minimizar o custo operacional do sistema elétrico, aplicando restrições para limitar as emissões de carbono das usinas termelétricas. Os autores aplicam a técnica de programação linear inteira mista para solucionar o problema. Entretanto, o trabalho não leva em consideração a vontade do proprietário do veículo e a técnica escolhida é computacionalmente complexa.

Uma estratégia de controle é apresentada por Nguyen, Zhang e Mahmud (2015) visando coordenar a recarga e descarga dos VEs de forma a minimizar o desbalanço de potência na rede com fontes renováveis, incluindo as restrições físicas do sistema e os requisitos do consumidor. Consideram-se as potências mínima e máxima e um limite de mudança abrupta na potência de saída para não comprometer a geração. Restringe-se as potências mínima e máxima que podem ser entregues e a capacidade de armazenamento da bateria dos veículos. Para garantir a satisfação dos consumidores, estabelece-se que os veículos devem ser recarregados até o valor definido pelo usuário. Todos esses requisitos da otimização são abordados com a técnica de programação linear sendo a função objetivo de valor quadrático médio e as restrições lineares. Porém, o trabalho não aborda nenhum outro critério de otimização importante, como as perdas na rede que podem ser expressivas neste caso. Também não consideram a redução de geração renovável, implicando que a função objetivo do problema pode não ser minimizada caso a geração seja maior que a demanda. Além disso, nos testes feitos, não se garante que a carga final de todos os VEs será atingida respeitando o critério de otimização.

Singh et al. (2015) apresentam uma arquitetura para coordenação em tempo real da recarga dos VEs ao nível da subestação de distribuição, com os agregadores controlando alimentadores secundários e estes controlando estações de recarga dos VEs. O modelo proposto pode ser utilizado para reduzir o pico de demanda e preenchimento de vale levando em consideração o estado de carga final da bateria estabelecido pelo usuário e limitando a taxa de recarga para os valores adequados. Os autores aplicam controladores fuzzy nos agregadores das subestações e estações de recargas para a coordenação. Para garantir a eficiência do modelo proposto, uma comunicação bidirecional robusta deve existir entre as interfaces atuantes e isto pode ser um empecilho no sistema elétrico atual.

Kavousi-Fard et al. (2015) buscam otimizar a coordenação dos VEPs e ao mesmo tempo definir a melhor topologia para a rede visando aumentar a confiabilidade e reduzir os custos, ou seja, considerando a reconfiguração de redes de distribuição. Como funções objetivos no problema de otimização têm-se os custos de intercâmbio de energia, custos

das perdas de energia, custo da energia não suprida e custo associado ao fornecimento do VEP para a rede. Dentre as restrições consideradas, destacam-se o balanço do fluxo de potência, limites de tensão e corrente e capacidade das baterias. A otimização é resolvida com o algoritmo de busca por organismo simbiótico auto-adaptável modificado. Além disso, modelam-se incertezas associadas com a geração eólica, VEPs, preço da energia e demanda ativa e reativa da carga com o método da simulação de Monte Carlo. Entretanto, o trabalho também não considera a vontade do proprietário do veículo em ter sua bateria recarregada e o estado de carga inicial da bateria dos VEPs no começo do dia é considerado como 100%, mas isto pode não ser verdade caso o veículo não consiga se recarregar completamente durante a noite e ter a bateria totalmente preenchida não é recomendado.

O artigo de Liu et al. (2015) foca nas estratégias de controle para que os VEs possam participar na regulação de frequência. Para isso, eles propõem uma arquitetura que possui agregadores, estações de recarga e veículos elétricos. O agregador é responsável por calcular a capacidade total de regulação de frequência e a potência esperada dos VEs a serem conectados. Duas estratégias de controle são definidas, sendo uma para manter o nível da carga da bateria dos VEs e outra para ajustar os níveis através da recarga ou descarga. Os autores afirmam que mesmo sem informações sobre o estado de carga atual das baterias, a carga final será atingida devido a determinação da energia esperada, mas isto não será atingido de forma otimizada.

Das metodologias pesquisadas, cada qual possuía seu objetivo de otimização. Entre eles, a maximização de lucros, a maximização da energia entregue e a redução do custo total da geração. Além desses, algumas pesquisas buscam incorporar o custo da degradação da bateria, minimizar o desvio entre a energia comprada e energia consumida pelos VEPs, prevenir a congestão da rede e minimizar os desvios de tensão. A eliminação de sobrecargas na rede, regulação de frequência, minimização do desbalanço de potência e aumento da confiabilidade também eram objetivos nas otimizações.

Para resolvê-las, diversas técnicas foram aplicadas, como programação linear fuzzy, enxame de partículas, enxame de partículas discreta fuzzy, algoritmo genético fuzzy. Em adição, programação evolucionária, sistemas artificiais imunes, algoritmo heurístico, algoritmo de seleção otimizado e programação linear inteira mista também foram aplicadas. Além desses, utilizaram-se também algoritmo de busca por organismo simbiótico auto-adaptável modificado, programação quadrática sequencial, princípio mínimo de Pontryagin e algoritmo heurístico de tempo polinomial baseado no arredondamento da programação linear.

Nas simulações, os perfis e características de carga devido a inserção dos VEPs eram definidos de variadas formas. Dentre eles, destacam-se a utilização de sistema especialista fuzzy, programação determinística, programação estocástica, programação quadrática inteira mista, simulação de Monte Carlo e separação fuzzy C-means.

Os métodos vistos abordaram a recarga tanto de forma centralizada como descentralizada. Diferentes interfaces foram criadas para se relacionar com os VEPs, como no agregador, operador do sistema de distribuição e cada unidade de veículo.

4 SISTEMA DE CONTROLE DA RECARGA DE VEHPs

Este capítulo descreve a metodologia do trabalho proposto, apresentando as variáveis envolvidas no sistema, como se dá a troca de informações entre as entidades criadas e quais ambientes computacionais foram utilizados para a construção do sistema.

Na primeira seção, algumas considerações iniciais da metodologia são expostas. Em seguida, o entendimento do sistema de controle da recarga é relatado, explicando seu funcionamento geral. Na terceira seção, o cálculo das potências máxima e mínima de cada agregador é exposto. Na sequência, a estratégia de otimização utilizada, seu objetivo de minimização e as restrições são discutidos. A quinta seção traz a modelagem do controlador fuzzy aplicado no sistema, definindo suas funções de pertinência, regras e outros parâmetros. Por fim, a sexta seção apresenta como o cálculo da taxa de recarga de cada veículo é realizada.

4.1 Considerações iniciais

Verificou-se na revisão bibliográfica que diversos trabalhos não consideram a vontade do proprietário do veículo em fornecer o mesmo para uma estratégia de recarga inteligente, levando em consideração sua necessidade do veículo após a recarga. Os trabalhos que consideram, levam em conta apenas a hora que o veículo será desconectado. Sendo assim, este trabalho assume a variável prioridade como sendo de suma importância para o sistema.

Considerando as duas abordagens de recarga coordenada centralizada e descentralizada antes definidas, o trabalho traz uma combinação dos dois conceitos. A abordagem centralizada é considerada pelo fato do agregador reunir as informações sobre a rede, carga e geração, e enviar comandos para cada VEHP. Já a segunda abordagem é levada em conta pelo fato de incluir a vontade do dono do VEHP em ter sua bateria totalmente recarregada.

O fluxo de potência unidirecional foi verificado como sendo o mais viável quando considerada a degradação da bateria, logo, é o fluxo considerado neste trabalho. Além disso, a implementação do fluxo bidirecional está mais distante do que o unidirecional, dado o fato de que a rede deverá passar por mais melhorias e o mercado elétrico terá que passar por adaptações.

A próxima seção explica o funcionamento do sistema como um todo, discriminando a troca de dados existente.

4.2 Sistema de controle da recarga

O sistema proposto possui duas interfaces principais: o centro de operação da distribuição (COD) e o agregador. O agregador é responsável por reunir informações dos VEHPs e dos consumidores, recebendo um valor de potência do COD para distribuir entre os veículos atendendo as prioridades definidas. Já o COD, atua para cumprir as exigências de todos os agregadores sob seu comando, determinando um valor de potência que otimize a operação da rede.

O entendimento geral do sistema proposto de controle da recarga visando o benefício do sistema elétrico de potência pode ser extraído das Figuras 2 e 3. A primeira figura ilustra a troca de informações entre o COD e um agregador. Na segunda figura, apresenta-se o passo-a-passo da troca de dados considerando mais de um agregador.

Assim que conectado na rede para a recarga, o VEHP comunica o agregador com os seguintes dados: 1) o seu estado de carga inicial (SOC_i), representando a porcentagem de carga que a bateria possui no momento; 2) a hora inicial da conexão (t_i), indicando o horário que foi conectado para recarga e; 3) a capacidade da sua bateria B_{cap} , sendo a energia que a bateria pode armazenar.

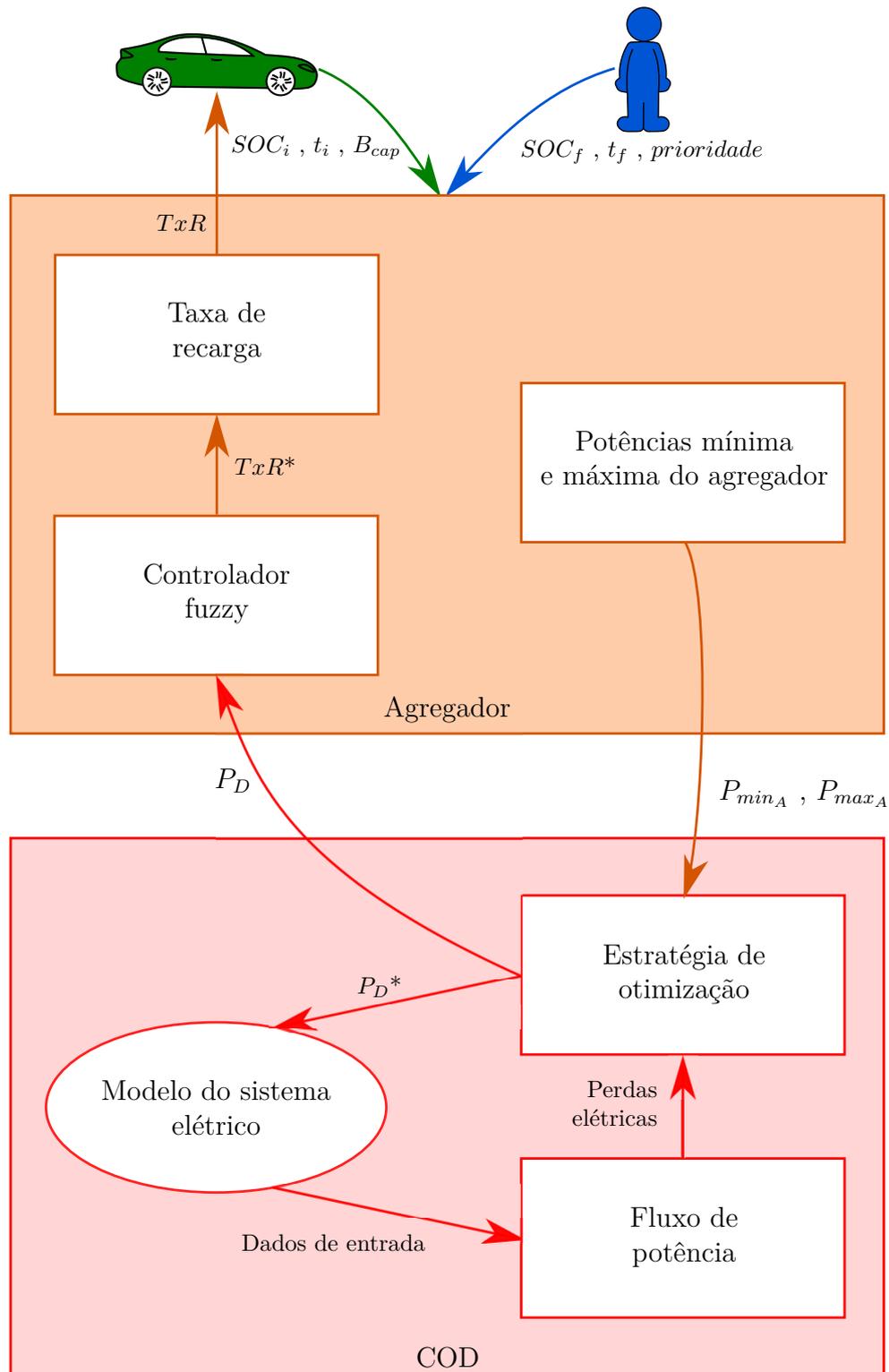
Ainda na conexão, o proprietário do veículo também informa três dados para o agregador: 1) o estado de carga final (SOC_f) que deseja que sua bateria seja recarregada; 2) a hora que deseja que a bateria esteja recarregada (t_f) e; 3) a *prioridade* na qual deseja que esta sua bateria seja totalmente recarregada até o estado de carga final no tempo de conexão à rede elétrica.

Com as seis variáveis de entrada recebidas de cada veículo na frota sob responsabilidade do agregador, este determina as potências mínima e máxima que deve receber do sistema para atender uma porcentagem mínima ou total das recargas dos veículos no tempo estipulado.

Cada agregador informa o COD com os valores das suas potências mínima e máxima, respectivamente, P_{min_A} e P_{max_A} . O COD então, que possui informações sobre o sistema elétrico de potência, e com os intervalos de potência dos agregadores recebidas realiza a distribuição de maneira ótima visando minimizar ou maximizar determinado objetivo.

O COD retorna para cada agregador o valor de potência ótimo que foi calculado dentro da faixa limitada por eles. O agregador, com base em um controlador fuzzy atuando na sua interface, calcula as taxas de recarga de cada VEHP, retornando o valor para que eles possam se recarregar.

Os índices * nas variáveis P_D e TxR indicam os valores iniciais e intermediários das variáveis da potência disponibilizada para o agregador e taxa de recarga, sendo eles



Legenda: TxR - Taxa de recarga; SOC_i - Estado de carga inicial; SOC_f - Estado de carga final; t_i - Hora da conexão do VEHP; t_f - Hora da desconexão do VEHP; B_{cap} - Capacidade da bateria do VEHP; P_{min_A} - Potência mínima do agregador; P_{max_A} - Potência máxima do agregador.

Figura 2 – Arquitetura geral do Sistema Inteligente para o Controle da Recarga de Veículos Elétricos Híbridos *Plug-In* Visando o Benefício do Sistema Elétrico de Potência.

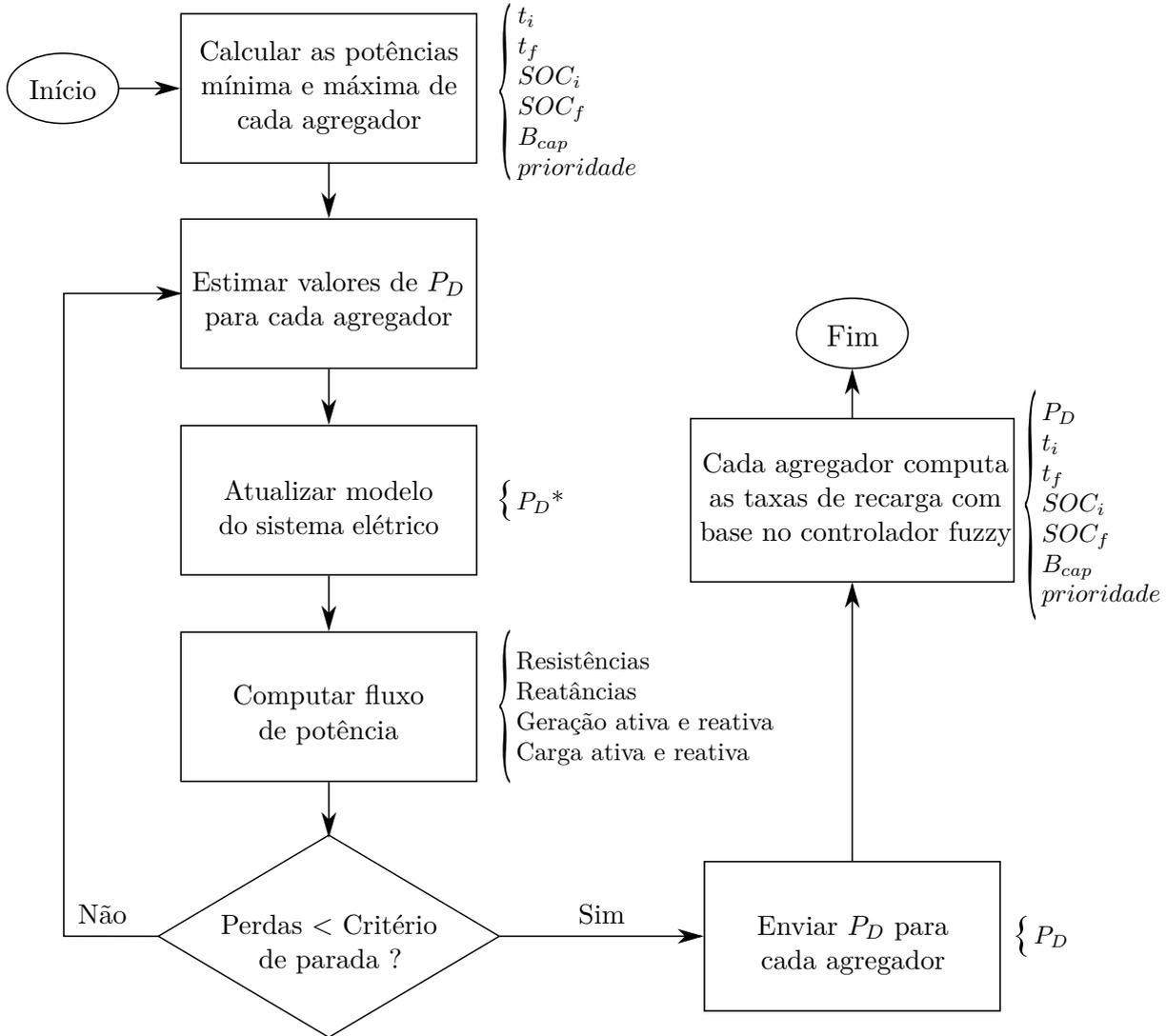


Figura 3 – Fluxograma de funcionamento geral do sistema de controle da recarga proposto.

Fonte: Elaborado pelo autor.

utilizados no processamento do sistema proposto, mas não são os valores finais a serem utilizados. Ou seja, P_D^* e TxR^* fazem parte de cálculo, mas apenas P_D é repassado para o agregador para que seja distribuído para os VEHPs e apenas TxR indica a qual taxa cada veículo irá se recarregar.

O sistema de controle da recarga foi programado no ambiente MATLAB® utilizando o toolbox fuzzy para definir o controlador fuzzy. A rede elétrica de teste foi criada e executada no simulador de sistemas de distribuição OpenDSS, onde o fluxo de potência foi resolvido.

As próximas seções relatam como cada etapa da metodologia foi construída. Primeiro, apresenta-se o cálculo das potências mínima e máxima de cada agregador. Após, a estratégia de otimização aplicada visando otimizar a operação da rede é exposta. Na sequência, apresenta-se a modelagem do controlador fuzzy no controle da recarga. Por

último, o cálculo da taxa de recarga de cada VEHP é descrito.

4.3 Cálculo das potências máxima e mínima

A potência máxima de cada agregador é o valor a ser requisitado da rede para que todos os VEHPs sejam completamente recarregados dentro dos seus respectivos tempos de conexão, independente das prioridades inseridas pelos consumidores. Este valor é obtido somando as potências individuais de cada VEHP, conforme mostra a Equação (4.1).

$$P_{max} = \sum_i^{n_{VEHP}} P_{VEHP_i} \quad (4.1)$$

Onde P_{VEHP_i} é a potência requisitada pelo VEHP i no agregador a cada hora dentro do intervalo que ficará conectado e n_{VEHP} é o número de VEHPs requisitando recarga no agregador.

A potência requisitada por cada VEHP pode ser obtida através de (4.2), sendo B_{cap_i} a capacidade da bateria do veículo i , em Watts-hora, Δt_{VEHP_i} o tempo que o veículo i ficará conectado para a recarga ($\Delta t_{VEHP_i} = t_f - t_i$), em horas e ΔSOC_i é a porcentagem do estado de carga que deve ser recarregado ($\Delta SOC_i = \Delta SOC_f - \Delta SOC_i$), em %.

$$P_{VEHP_i} = \frac{B_{cap_i}}{\Delta t_{VEHP_i}} \times \frac{\Delta SOC_i}{100} \quad (4.2)$$

A potência mínima descreve um valor mínimo de potência que o agregador requisitará para garantir a recarga de apenas uma parcela dos VEHPs, especialmente os que possuem prioridade de recarga maior. Este valor é obtido em função da potência requisitada por cada VEHP conforme a Equação (4.2) e as prioridades inseridas pelos consumidores, ou seja, $P_{min} = f(P_{VEHP_i}, \text{prioridade})$.

Os requisitos a serem atendidos para o cálculo da potência mínima de cada agregador foram definidos como:

- a) Recarregar 100% da potência requisitada pelos VEHPs com prioridade maior ou igual a 0,50;
- b) Recarregar 50% da potência requisitada pelos VEHPs com prioridade maior ou igual a 0,30 e menor que 0,50;
- c) Recarregar 30% da potência requisitada pelos VEHPs com prioridade maior ou igual a 0,10 e menor que 0,30;
- d) Recarregar 10% da potência requisitada pelos VEHPs com prioridade menor que 0,10.

Desta forma, a potência mínima fica definida conforme apresentado na Equação (4.3), onde aplicam-se os devidos pesos para os veículos com as prioridades dentro dos respectivos intervalos.

$$P_{min} = w_1 \times \sum_{\substack{i \\ prioridade \geq 0,50}} P_{VEHP_i} + w_2 \times \sum_{\substack{i \\ 0,30 \leq prioridade < 0,50}} P_{VEHP_i} + w_3 \times \sum_{\substack{i \\ 0,10 \leq prioridade < 0,30}} P_{VEHP_i} + w_4 \times \sum_{\substack{i \\ prioridade < 0,10}} P_{VEHP_i} \quad (4.3)$$

Onde w_1 , w_2 , w_3 e w_4 são os pesos que limitam as potências a serem requisitadas por cada faixa de prioridade. Como descrito anteriormente, as potências dos veículos com prioridades maior que 0,50 serão 100% levadas em consideração, ou seja, $w_1 = 1$; no segundo caso, $w_2 = 0,50$; no terceiro, $w_3 = 0,30$ e; veículos com prioridade menor que 0,10 terão um peso $w_4 = 0,10$.

Assim, de acordo com os veículos conectados em um agregador, as potências máxima e mínima podem ser calculadas. Estes valores são repassados de cada agregador para o COD que, por sua vez, irá gerar os valores de potência de forma a minimizar as perdas da rede elétrica sob estudo com a estratégia de otimização implementada.

4.4 Estratégia de otimização

Com as potências mínima e máxima de cada agregador, o modelo do sistema elétrico e uma ferramenta para computar o fluxo de potência, o COD obtém valores de potências para cada agregador através de uma estratégia de otimização.

O problema de otimização é abordado neste trabalho aplicando um método de busca heurística, onde valores de potências dos agregadores são gerados dentro dos limites de potências mínima e máxima e testados no modelo da rede. Conforme definido por Kagan et al. (2009), este tipo de busca é categorizada como uma variante da técnica gerar e testar (do inglês *generate-and-test*), ou também busca exaustiva. Nela, gera-se um possível candidato à solução do problema e checka-se se o mesmo é uma solução conveniente do objetivo da otimização. Caso não, novos candidatos são gerados, testados e validados até que se tenha uma resposta condizente ou algum critério de parada seja atingido.

A minimização de perdas de energia é definida como o objetivo da otimização desta aplicação, como apresentado em (4.4), sujeito a restrição das potências mínima e máxima de cada agregador, conforme (4.5). Esta minimização é realizada a cada intervalo de tempo Δt , podendo ser aplicada para analisar as perdas em horas, dias, meses ou anos.

$$\min \sum_{l=1}^{n_l} R_l I_l^2 \times \Delta t \quad (4.4)$$

$$P_{\min_j} \leq P_{D_j} \leq P_{\max_j} \quad (4.5)$$

Onde l é o índice que indica a linha, n_l é o número total de linhas do sistema sob estudo, R_l é a resistência da linha l , I_l é a corrente elétrica na linha l e Δt é o intervalo de discretização. P_{\min_j} e P_{\max_j} são as potências mínima e máxima que o agregador calculou, respectivamente e P_{D_j} a potência que ele irá receber do COD.

As demais restrições do sistema são levadas em consideração na ferramenta de execução do fluxo de potência, sendo elas apresentadas nas Equações (4.6)-(4.11) dos itens abaixo.

- Balanço de potência da carga e geração:

$$P_i = \sum P_{ij} \quad (4.6)$$

$$Q_i = \sum Q_{ij} \quad (4.7)$$

Onde P_i é a potência ativa injetada na barra i , Q_i é a potência reativa injetada na barra i , P_{ij} é a potência ativa da barra i para a barra j e Q_{ij} é a potência reativa da barra i para a barra j .

- Módulo da tensão em cada barra:

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad (4.8)$$

Sendo V_i^{\min} o menor módulo de tensão permitido na barra i e V_i^{\max} o maior módulo de tensão permitido na barra i .

- Tap do transformador e dos reguladores de tensão:

$$a_{ij\min} \leq a_{ij} \leq a_{ij\max} \quad (4.9)$$

$a_{ij\min}$ é o menor tap permitido no transformador e regulador de tensão do circuito $i - j$ e $a_{ij\max}$ é o maior tap permitido no transformador e regulador de tensão do circuito $i - j$.

- Potência reativa capacitiva:

$$0 \leq QC_i \leq QC_i^{max} \quad (4.10)$$

QC_i^{max} é o maior valor de potência reativa capacitiva permitido na barra i .

- Carregamento nos circuitos:

$$\sqrt{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2} \leq S_{ij}^{max} \quad (4.11)$$

Onde S_{ij}^{max} é o máximo carregamento permitido no circuito $i - j$, P_{ij} é a potência ativa no circuito $i - j$ e Q_{ij} é a potência reativa no circuito $i - j$.

O método de busca heurística aplicado neste trabalho utiliza as equações (4.4) e (4.5) atribuindo potências para os agregadores, executando o fluxo de potência e obtendo a soma de todas as perdas do circuito. Faz-se isso para um determinado número de soluções, constituindo o espaço de busca, e o conjunto de potências que retorna as menores perdas será repassado para os agregadores.

O caso em que a otimização é aplicada, as potências enviadas para os agregadores serão as potências necessárias para recarregar apenas a parte da frota que possui prioridade elevada, conforme descrito anteriormente no cálculo das potências. Caso o método de otimização não fosse aplicado, as potências que os agregadores receberiam seriam um valor suficientemente alto para recarregar todos os VEHPs indiferente de suas prioridades.

Assim sendo, o método de otimização aplicada encontra valores otimizados de potências para cada agregador dentro dos limites mínimo e máximo e ao mesmo tempo reduzindo as perdas totais do sistema com estas potências enviadas.

4.5 Modelagem do controlador fuzzy aplicada ao controle da recarga

A metodologia fuzzy apresenta-se como uma técnica eficaz para incorporar o conhecimento humano na resolução de um problema, sendo ele complexo ou não, e foi escolhida para compor o núcleo do controle da recarga deste projeto dado que a prioridade inserida pelo consumidor passa a ser parte do sistema (ROSS, 2010). O método de inferência utilizado foi o Mandami, onde a saída é definida como funções de pertinência. Uma abordagem geral da lógica fuzzy e dos sistemas de inferência fuzzy são apresentados no Apêndice A.

O controlador fuzzy possui as duas variáveis de entrada ΔSOC e *prioridade* e a variável de saída taxa de recarga inicial (TxR^*), sendo que o conjunto de regras

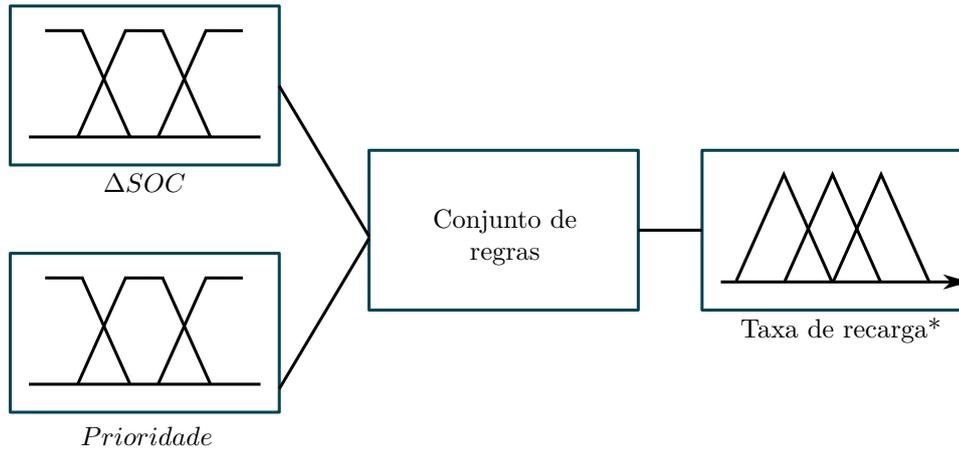


Figura 4 – Estrutura do controlador fuzzy para esta aplicação.

Fonte: Elaborado pelo autor.

é responsável por definir a saída com base nas entradas. A representação geral deste controlador é ilustrado na Figura 4.

O conjunto de regras e as funções de pertinência foram escolhidas empiricamente. Ou seja, definiram-se cada uma delas e realizaram-se testes com diferentes combinações. O conjunto que retornou as melhores respostas foi escolhido para compor o controlador.

As três subseções seguintes apresentam as funções de pertinência escolhidas para a entrada e saída, o conjunto de regras definido e os demais parâmetros.

4.5.1 Funções de pertinência

A função de pertinência de entrada ΔSOC , que representa a porcentagem da bateria a ser recarregada, foi dividida em três conjuntos fuzzy: baixa, média e alta. Isto implica que a bateria pode necessitar de baixa, média ou alta carga. Após alguns testes, definiram-se as funções de pertinência para esta variável conforme exposto na Figura 5. A representação utilizando o vetor de três elementos dos conjuntos é definida como exposto na Equação (4.12).

$$\begin{aligned}
 \text{Baixa} &: [-40, 0, 40] \\
 \text{Média} &: [10, 50, 90] \\
 \text{Alta} &: [60, 100, 140]
 \end{aligned}
 \tag{4.12}$$

A segunda variável de entrada, *prioridade*, foi definida com três conjuntos fuzzy: não, talvez e sim. Significando que o proprietário do veículo pode escolher entre não ter nenhuma prioridade, talvez ter alguma prioridade e definitivamente ter prioridade para recarregar totalmente a bateria no tempo estipulado. Após testes, obteve-se a melhor definição dos conjuntos que são apresentados na Figura 6 e representados por vetores de

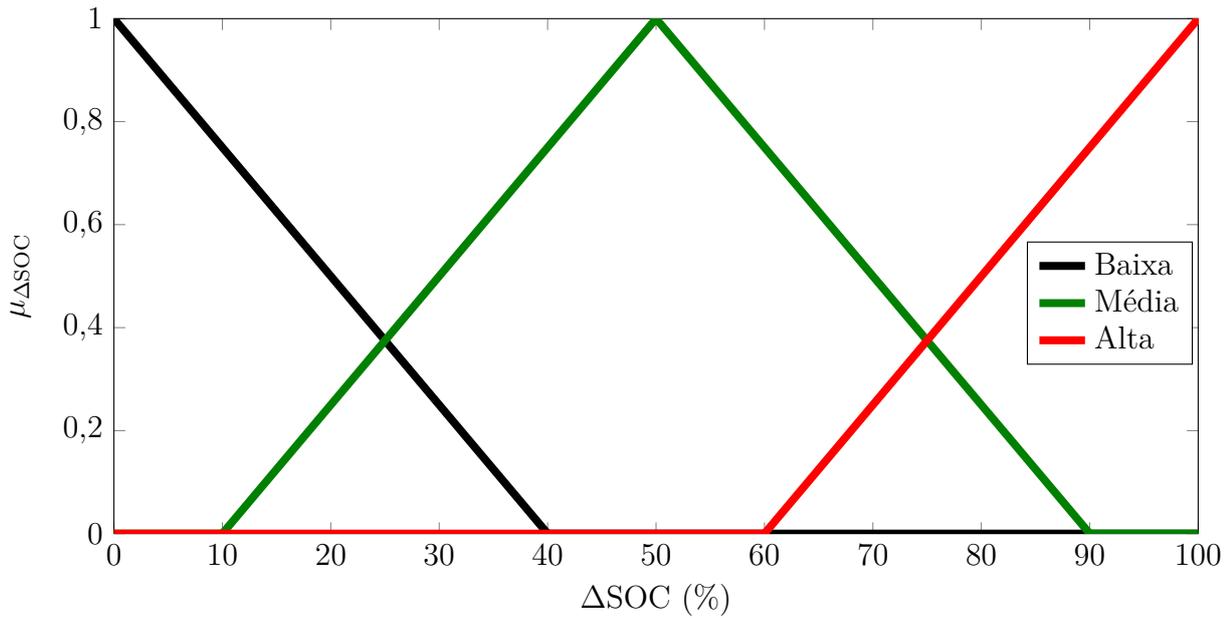


Figura 5 – Conjuntos fuzzy para a variável de entrada ΔSOC .

Fonte: Elaborado pelo autor.

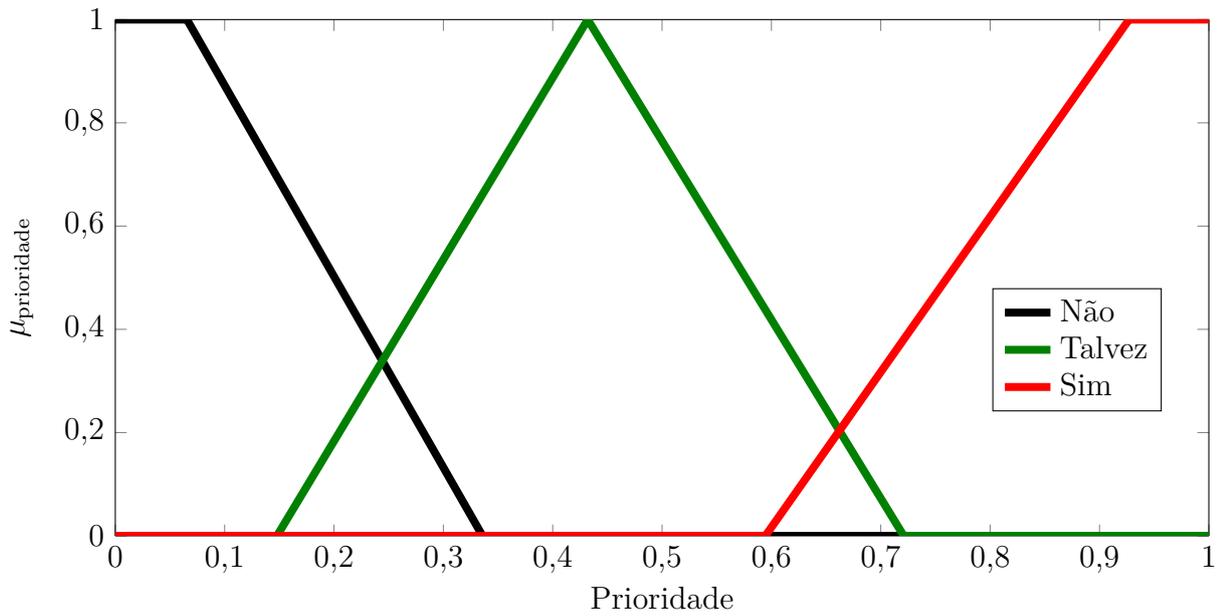


Figura 6 – Conjuntos fuzzy para a variável de entrada prioridade.

Fonte: Elaborado pelo autor.

três e quatro elementos da Equação (4.13).

$$\begin{aligned}
 \text{Não} &: [-0,36, -0,04, 0,0655, 0,3358] \\
 \text{Talvez} &: [0,1479, 0,432, 0,721] \\
 \text{Sim} &: [0,5945, 0,927, 1,01, 1,17]
 \end{aligned}
 \tag{4.13}$$

A variável de saída taxa de recarga inicial, TxR^* , foi dividida em quatro conjuntos

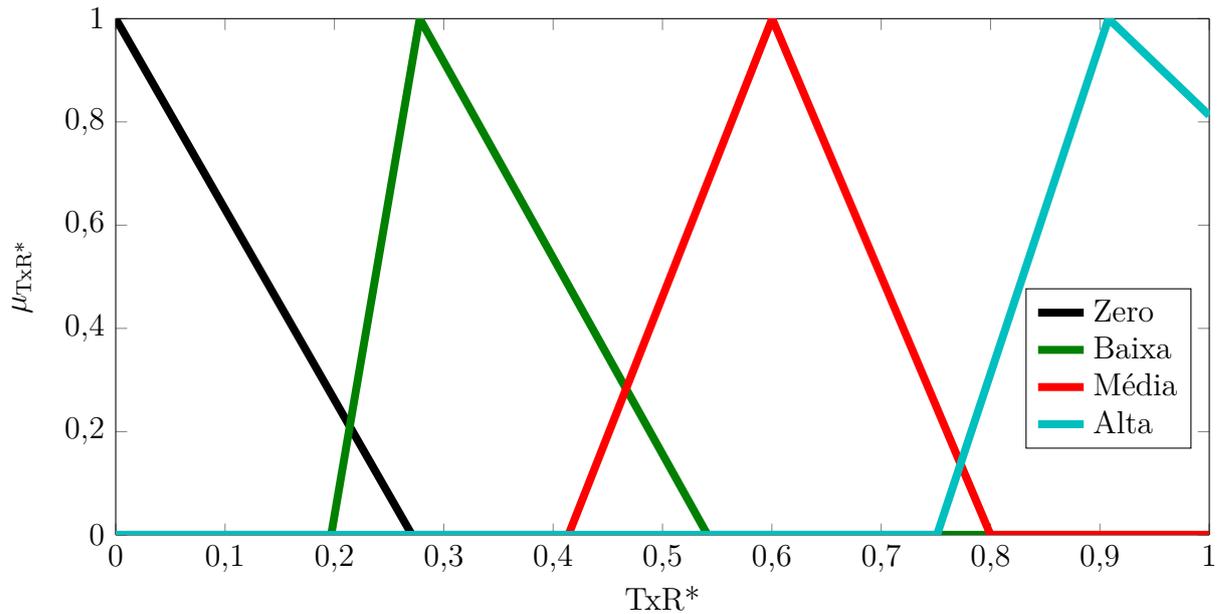


Figura 7 – Conjuntos fuzzy para a variável de saída taxa de recarga (TxR*).

Fonte: Elaborado pelo autor.

fuzzy: zero, baixa, média e alta. Tem-se, então, que o veículo receberá energia do agregador a uma taxa zero, baixa, média ou alta. A disposição das funções de pertinências encontradas como mais adequadas para esta aplicação são ilustradas na Figura 7 e também na Equação (4.14).

$$\begin{aligned}
 \text{Zero} &: [-0,4, -0,0,2709] \\
 \text{Baixa} &: [0,197, 0,278, 0,5412] \\
 \text{Média} &: [0,414, 0,6003, 0,8] \\
 \text{Alta} &: [0,751, 0,9078, 1,4]
 \end{aligned} \tag{4.14}$$

4.5.2 Conjunto de regras

Para os conjuntos fuzzy de entrada e saída definidos anteriormente, criaram-se as regras apresentadas na Tabela 4. Todas elas possuem o mesmo peso e também podem ser interpretadas da forma simplificada exposta na Tabela 5.

As tabelas anteriores explicitam que dependendo do valor de ΔSOC e *prioridade* do VEHP, um dado conjunto fuzzy da saída TxR^* é disparado. Por exemplo, caso a diferença de SOC a ser completado seja baixa e o consumidor deseje que a bateria seja totalmente recarregada dentro do tempo de conexão, então a taxa de recarga inicial será definida como baixa. Caso, a bateria necessite de alta carga e também exista prioridade de recarga, então a taxa de recarga inicial é retornada como alta.

Tabela 4 – Conjunto de regras criadas para atuar no controlador fuzzy.

Número	Regra
1	SE ΔSOC é baixa E <i>prioridade</i> é sim ENTÃO TxR^* é baixa .
2	SE ΔSOC é baixa E <i>prioridade</i> é talvez ENTÃO TxR^* é zero .
3	SE ΔSOC é baixa E <i>prioridade</i> é não ENTÃO TxR^* é zero .
4	SE ΔSOC é média E <i>prioridade</i> é sim ENTÃO TxR^* é média .
5	SE ΔSOC é média E <i>prioridade</i> é talvez ENTÃO TxR^* é baixa .
6	SE ΔSOC é média E <i>prioridade</i> é não ENTÃO TxR^* é zero .
7	SE ΔSOC é alta E <i>prioridade</i> é sim ENTÃO TxR^* é alta .
8	SE ΔSOC é alta E <i>prioridade</i> é talvez ENTÃO TxR^* é média .
9	SE ΔSOC é alta E <i>prioridade</i> é não ENTÃO TxR^* é baixa .

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 5 – TxR^* ativada para diferentes combinações das variáveis de entrada ΔSOC e *prioridade*.

<i>prioridade</i> \ ΔSOC	Baixa	Média	Alta
	Sim	Baixa	Média
Talvez	Zero	Baixa	Média
Não	Zero	Zero	Baixa

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5.3 Outros parâmetros

Com todas as funções de pertinência modeladas, os outros parâmetros para completar a modelagem do controlador fuzzy foram definidos como:

- Método AND: min;
- Método de implicação: min;
- Método de agregação: max;
- Método de defuzzificação: bissetor.

Os métodos AND, de implicação e agregação foram escolhidos com base nas recomendações de Mathworks (2015), onde cita-se que são os melhores métodos para serem escolhidos no desenvolvimento de um sistema fuzzy. Com o modelo construído, outros métodos foram testados, mas os listados acima continuaram sendo os mais adequados.

O método de defuzzificação foi escolhido após a execução de simulações com o controlador fuzzy. Os métodos centroide, menor dos máximos, média dos máximos e maior

dos máximos também foram testados, mas o bissetor foi o que minimizou a soma dos tempos residuais.

Define-se como tempo residual, a diferença entre o tempo que o veículo ficará conectado para recarga (Δt_{VEHPi}) e o tempo necessário para recarregar a bateria utilizando a taxa de recarga calculada pelo controlador (Δt_{SOCi}). Os dois termos são obtidos pelas Equações (4.15) e (4.16), respectivamente, e o tempo residual por (4.17).

$$\Delta t_{VEHPi} = t_f - t_i \quad (4.15)$$

$$\Delta t_{SOCi} = \frac{\Delta SOC_i}{100 \times TxR_i^*} \quad (4.16)$$

$$\text{Tempo residual} = \Delta t_{VEHPi} - \Delta t_{SOCi} \quad (4.17)$$

Minimizando a soma dos tempos residuais de todos os VEHPs garante que o método de defuzzificação escolhido é o que recarrega mais veículos dentro do tempo que estarão conectados na rede. Isso pode ser entendido também como, se o tempo que o veículo ficará conectado for menor que o tempo necessário para recarregar o SOC até final, o veículo não terá sua bateria totalmente recarregada considerando a taxa de recarga calculada.

Nessa condição, a taxa de recarga deve aumentar na próxima iteração para atender a recarga caso a prioridade seja alta. Com isso, algumas modificações são feitas no sistema para o cálculo da taxa de recarga visando garantir que a prioridade do dono possua mais influência nas taxas de recarga calculada. A próxima seção explicita estas modificações.

4.6 Cálculo da taxa de recarga

A primeira modificação após a obtenção da taxa de recarga inicial, consiste em ponderá-la diretamente em função do tempo de conexão para recarga, Δt_{VEHPi} , e o tempo necessário para recarregar o veículo, Δt_{SOCi} . Este peso é diretamente aplicado para cada taxa de recarga conforme a Equação (4.18), que foi desenvolvida durante a construção do sistema.

$$TxR_i = TxR_i^* \times [1 - (\Delta t_{VEHPi} - \Delta t_{SOCi})] \times \left(\frac{prioridade_i}{\alpha} \right) \quad (4.18)$$

Onde α é uma constante adimensional obtida da simulação para permitir um pequeno incremento na taxa de recarga. Neste trabalho seu valor foi atribuído como 10^4 . Ambos os tempos Δt_{VEHPi} e Δt_{SOC} são dados em horas e TxR_i^* e $prioridade_i$ são adimensionais.

A Equação (4.18) dita um pequeno aumento a ser aplicado na taxa de recarga considerando a taxa do controlador, a prioridade e os tempos de conexão necessários para recarregar. Se um veículo possui uma taxa de recarga menor que a esperada para atingir o SOC alvo e a prioridade é alta, então a taxa de recarga passará a ser um valor maior. Caso o mesmo veículo possua uma prioridade baixa, então a taxa de recarga irá passar por um incremento menor quando comparado ao primeiro caso.

A segunda e última modificação é o processo de balanço de potência que os veículos irão receber com a potência disponível no agregador, obedecendo a Equação (4.19).

$$\sum_i^{n_{VEHP}} P_{VEHP_i} = P_D \quad (4.19)$$

Onde P_{VEHP_i} é a potência, em watts, do veículo i no agregador, n_{VEHP} é o número de VEHPs no agregador e P_D , em watts, é a potência disponível no agregador. O balanço de potência é um fator chave para coordenar o carregamento dos VEHPs com a condição atual da rede elétrica repassada pelo operador do sistema.

O primeiro passo para executar esta modificação consiste em calcular a potência requerida por cada veículo de acordo com a taxa de recarga previamente calculada. A Equação (4.20) mostra como esse cálculo é realizado.

$$P_{req_i} = \frac{TxR_i \times B_{cap_i}}{\Delta t} \quad (4.20)$$

Onde TxR_i é a taxa de recarga do veículo i ; B_{cap_i} é a capacidade da bateria do veículo i , em watts-hora; Δt é o intervalo de discretização da simulação, em horas e; P_{req_i} é a potência requisitada pelo veículo i .

Na Equação (4.20) a potência requisitada é calculada utilizando a energia que a bateria do veículo suporta e a taxa de recarga que esta bateria será recarregada, que nada mais é do que a porcentagem da capacidade da bateria. Como é necessário fazer a conversão entre energia e potência, o tempo de discretização é utilizado para tal.

Após, aplica-se a normalização matemática com respeito a potência disponível no agregador para atingir o balanço de potência. A Equação (4.21) apresenta a normalização feita, sendo P_D a potência disponível no agregador, em watts.

$$P_{req_i} = \frac{P_{req_i} \times P_D}{\sum_i P_{req_i}} \quad (4.21)$$

Com os valores da potência requisitada por cada veículo normalizado, aplica-se o processo inverso da Equação (4.20) para recalculer a taxa de recarga, como mostrado na

Equação (4.22).

$$TxR_i = \frac{P_{req_i} \times \Delta t}{B_{cap_i}} \quad (4.22)$$

Agora, o valor modificado da taxa de recarga está pronto para ser repassado para os veículos elétricos híbridos *plug-in*. Este é o valor final da taxa de recarga retornada pelo sistema de controle da recarga. É com este valor que os resultados são apresentados na próxima seção. A atualização do SOC_i também é feita utilizando este valor, dado que o VEHP será recarregado a esta taxa durante o intervalo de tempo discretizado da simulação.

O cálculo das potências mínima e máxima, a execução do controlador fuzzy, o cálculo das taxas de recarga e a estratégia de otimização foram construídas e testadas no ambiente de programação MATLAB[®], sendo que o toolbox de lógica fuzzy foi utilizado para construir o controlador. Já o fluxo de potência do sistema teste com a penetração das frotas de VEHPs foi executado no software OpenDSS. Assim sendo, o MATLAB[®] comunica-se com o OpenDSS atualizando o valor da potência enviada para cada agregador de acordo com o calculado pelo método de otimização.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos do sistema proposto de controle da recarga de VEHPs visando o benefício do sistema elétrico de potência. As seções 5.1 a 5.3 apresentam os resultados da estratégia de controle considerando um agregador recarregando sua frota de acordo com o valor otimizado de potência recebido do COD. Na seção 5.4 consideram-se as 9 frotas recebendo valores de potência otimizados do COD de acordo com o critério de otimização.

5.1 Frota de VEHPs se recarregando

O primeiro resultado foi obtido simulando uma frota de 20 VEHPs se recarregando, considerando que todos foram conectados no mesmo horário, deverão se recarregar até o mesmo estado de carga final e possuem a mesma capacidade da bateria. Entretanto, os VEHPs foram conectados com diferentes estados de carga inicial, e desconectados em diferentes horários com prioridades diversificadas. A Figura 8 apresenta as taxas de recarga obtida para alguns dos veículos dessa frota.

Verifica-se na Figura 8 que as taxas de recarga permanecem constantes durante as cinco primeiras horas do tempo de simulação. Após, quando a taxa de recarga do veículo 4 cai a zero, os outros veículos são sujeitos a um incremento na taxa. Analisando apenas

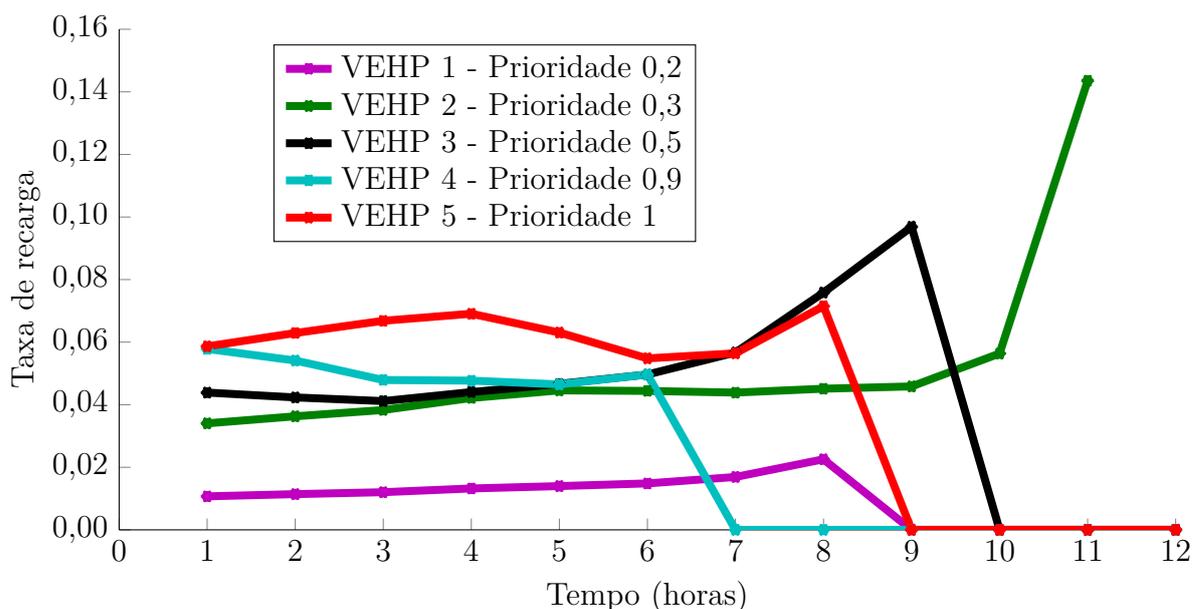


Figura 8 – Taxas de recarga para alguns dos VEHPs da frota sob estudo.

Fonte: Elaborado pelo autor.

os veículos apresentados no gráfico, isto acontece pelo fato de que a partir da hora 6 a potência disponível no agregador será distribuída entre os quatro veículos restantes, onde antes existiam 5.

Nota-se também que as curvas das taxas de recarga de cada veículo estão ordenadas de acordo com a prioridade inserida pelo consumidor, implicando que quanto maior a prioridade, maior é a taxa de recarga retornada pelo sistema. Na Figura 8, o VEHP 5 possui uma prioridade máxima de 1 e é a curva com a maior taxa de recarga durante o intervalo da simulação, só sendo reduzida a zero quando o SOC alvo é atingido. Já o veículo 1, com a menor prioridade da amostragem representada no gráfico, possui sua taxa de recarga reduzida em relação aos outros. A seção 5.2 analisará este comportamento da prioridade de forma mais evidente.

Apesar da taxa de recarga ser a variável de saída do sistema para o veículo, em quesitos de visualização, o estado de carga da bateria também apresenta-se como apropriado, dado que é possível visualizar o incremento da carga da bateria durante a simulação. A Figura 9 mostra o estado de carga das baterias da mesma parcela de veículos considerados anteriormente.

Observa-se na figura que o estado de carga do veículo 3 aumenta de forma aproximadamente linear e após atingir 70% se estabiliza nesse valor. A prioridade para este veículo é 0,5, uma prioridade média, logo o sistema não possui a obrigação máxima para atingir o SOC final, mas deve fornecer energia a uma taxa de recarga aceitável. Este é exatamente a resposta do sistema, elevando a carga da bateria de aproximadamente 20 para 70%, mesmo o veículo com prioridade média. A recarga só não é completada até o

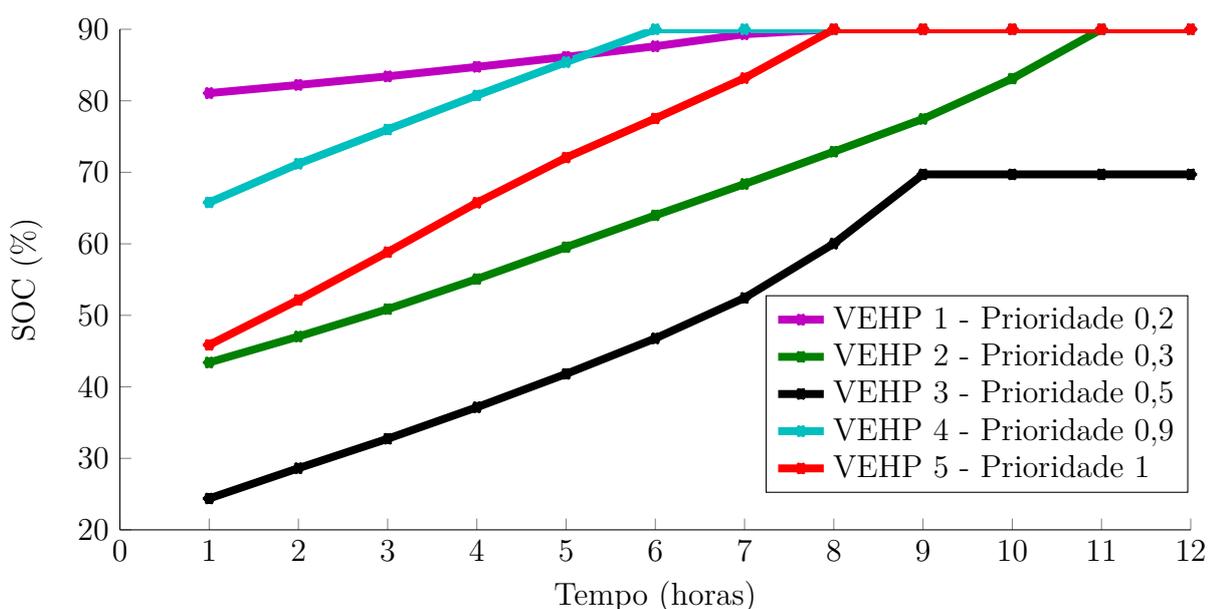


Figura 9 – Estados de carga atualizados para alguns dos VEHPs da frota sob estudo.

Fonte: Elaborado pelo autor.

SOC final de 100% porque o veículo é desconectado da rede. Caso o consumidor queira a bateria totalmente recarregada no intervalo de conexão, ele deve aumentar a prioridade no começo da recarga. Esta mudança da prioridade do VEHP 3 irá alterar a resposta do sistema conforme ilustrado na Figura 10.

Em ambas as Figuras 9 e 10, observa-se que o veículo com prioridade 0,9 (VEHP 4) recarrega mais rápido do que o veículo com prioridade 1 (VEHP 5). O estado de carga inicial do VEHP 4 é de 65% e o SOC_i do VEHP 5 é de aproximadamente 45%. Os dois veículos devem atingir 90% de SOC final. Como as prioridades são valores próximos (0,9 e 1), o sistema de controle da recarga atribui uma importância praticamente igual para os dois veículos. Entretanto, como a porcentagem de carga a ser preenchida para o VEHP 4 é menor, ele se recarrega mais rapidamente do que o VEHP 5. Apesar deste comportamento, o SOC_f do veículo 5 também é atingido.

Em adição ao discutido anteriormente, o conjunto fuzzy da variável de entrada prioridade acionado para os valores 0,9 e 1 é o mesmo: prioridade sim. Dessa forma, na inferência das variáveis de entrada para a variável de saída através do conjunto de regras, os casos dos VEHPs 4 e 5 são similares, diferindo apenas no SOC a ser preenchido. Isso enfatiza a justificativa do porquê o veículo 4 se recarrega mais rápido que o veículo 5, sendo que o primeiro possui prioridade menor que o último.

Com as respostas apresentadas nesta seção, verifica-se que o sistema de recarga está respondendo de forma inteligente para os pedidos de recarga, dado que está adaptando os cálculos de acordo com os estados dos VEHPs e as prioridades dos consumidores. Os

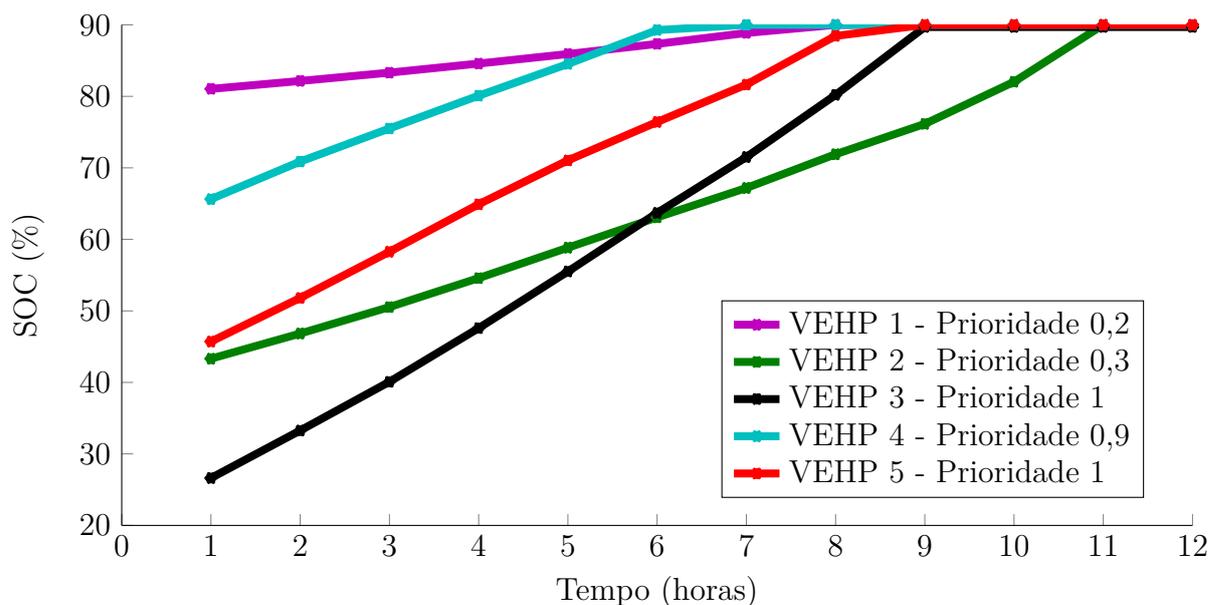


Figura 10 – Estados de carga atualizados para alguns dos VEHPs da frota sob estudo considerando uma mudança na prioridade do VEHP 3.

resultados estão correspondendo com o objetivo inicial, pois atua em conjunto com a potência disponível no agregador para recarregar os VEHPs.

5.2 Influência da prioridade

Buscando evidenciar a influência da prioridade inserida pelo consumidor na recarga de um VEHP, construíram-se os gráficos das Figuras 11 e 12. Estes resultados foram obtidos considerando a mesma frota de veículos da seção anterior, mas simulando diversas vezes alterando em cada uma a prioridade de apenas um VEHP e mantendo os demais parâmetros inalterados.

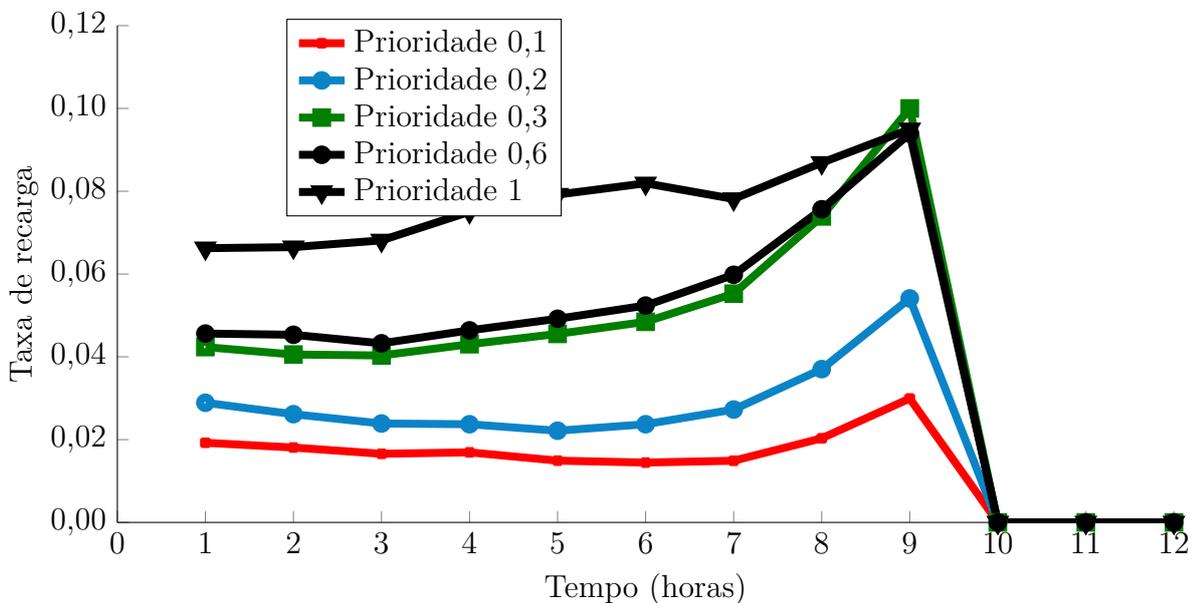


Figura 11 – Taxas de recarga de um VEHP com sua prioridade alterada, mas demais parâmetros inalterados.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dois gráficos expostos apresentam o mesmo comportamento de deslocamento no eixo y. Tanto a taxa de recarga como o subsequente estado de carga atualizado possuem valores maiores em cada horário conforme a prioridade cresce. Logo, com uma prioridade maior a taxa de recarga é maior e a bateria se recarrega mais rápido quando comparando com uma prioridade baixa.

Tem-se então que a prioridade está influenciando diretamente no cálculo da taxa de recarga, o que era esperado desde o início: uma prioridade maior indica uma garantia de ter a bateria totalmente recarregada dentro do período de conexão.

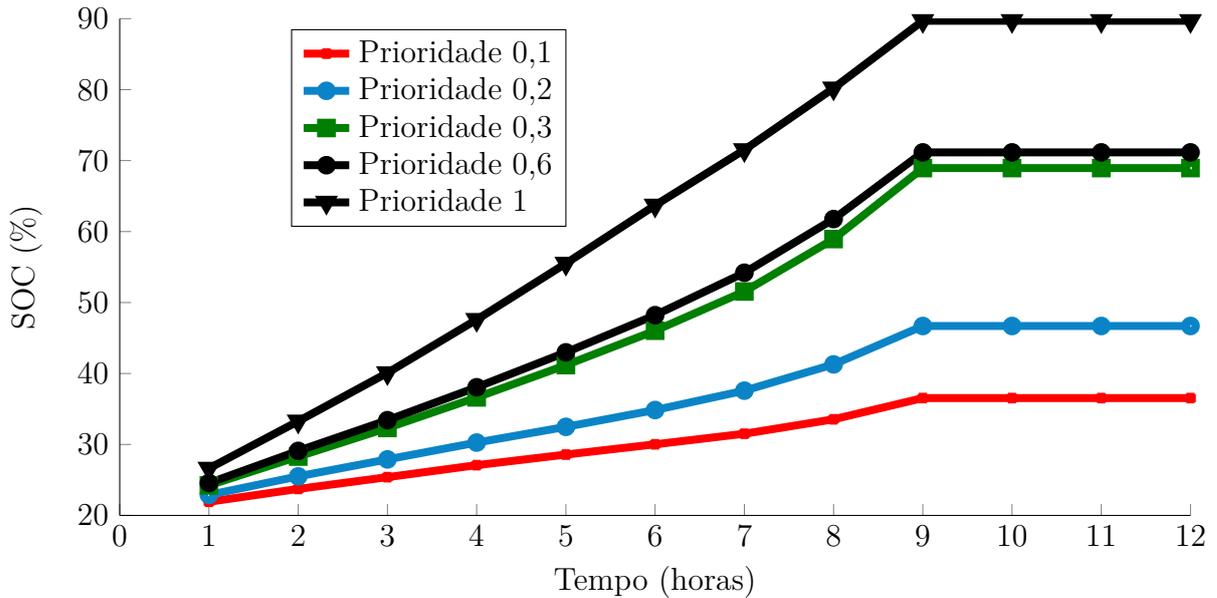


Figura 12 – Estado de carga de um VEHP com sua prioridade alterada, mas demais parâmetros inalterados.

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3 Influência de P_D

Um outro resultado consiste em analisar a influência que o valor da potência disponibilizada pelo COD para o agregador possui no sistema de controle da recarga. Para isto, a simulação foi configurada para acontecer sem nenhuma restrição de tempo de parada, monitorando quantas iterações são necessárias para recarregar os veículos sem qualquer alteração dos seus parâmetros, somente variando a potência disponível. Baseado nisto, gerou-se o gráfico da Figura 13 onde o número de iterações foi monitorado com a variação de P_D .

Com o gráfico pode-se apontar que quanto maior a potência que o COD disponibiliza para o agregador, menor é o número de iterações necessárias para recarregar os VEHPs, implicando que o tempo de recarga também será menor para cada unidade de veículo. Isso é claro na figura pois o número de iterações diminui com o aumento de P_D . Em consequência, a potência do agregador é distribuída para os VEHPs, indicando que um valor de potência maior resulta em taxas de recarga maiores, suprindo mais energia para cada veículo no mesmo intervalo de tempo.

Uma outra análise pode ser feita verificando a mudança na porcentagem do SOC a ser recarregado em função da potência disponível para um determinado intervalo de tempo. Neste caso, simulou-se a frota se recarregando com diferentes valores de P_D . Então, construiu-se a curva da Figura 14 onde o somatório do estado de carga restante para ser preenchido, no intervalo de tempo sob estudo, é relacionado em função da potência disponível.

Verifica-se o mesmo que o somatório de todas as porcentagens de SOC restantes para serem recarregadas pelo agregador decresce linearmente com o aumento de P_D . Ou seja, com a potência disponível aumentando, o número de iterações da simulação diminui e as chances de atingir o SOC final estabelecido pelo consumidor aumentam.

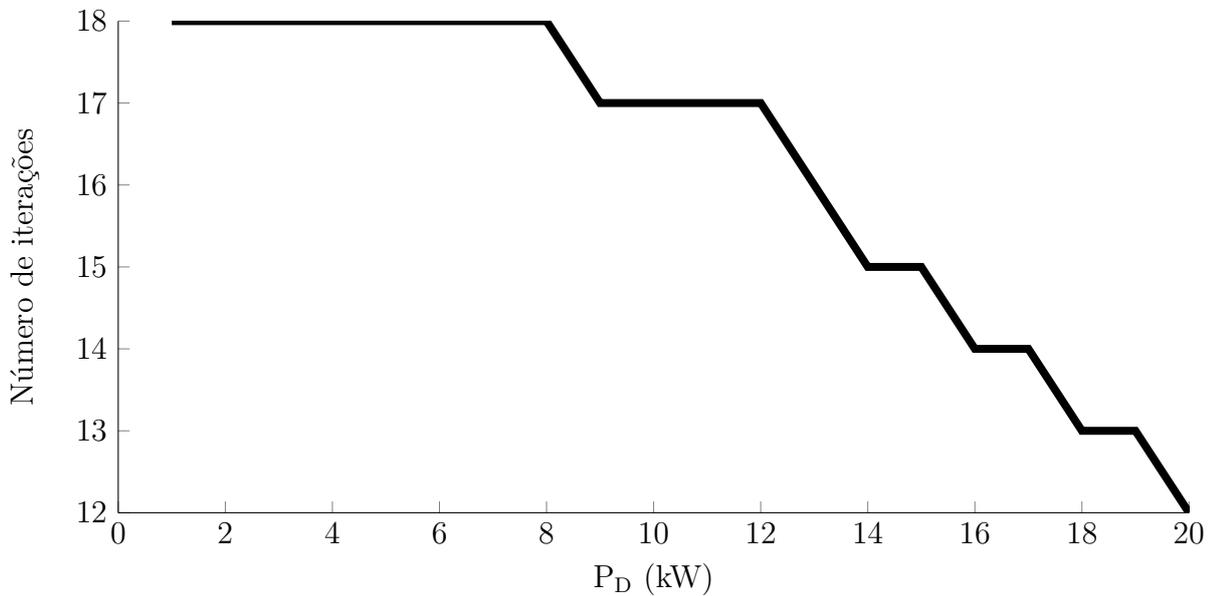


Figura 13 – Número de iterações necessárias para recarregar os VEHPs em função de P_D .

Fonte: Elaborado pelo autor.

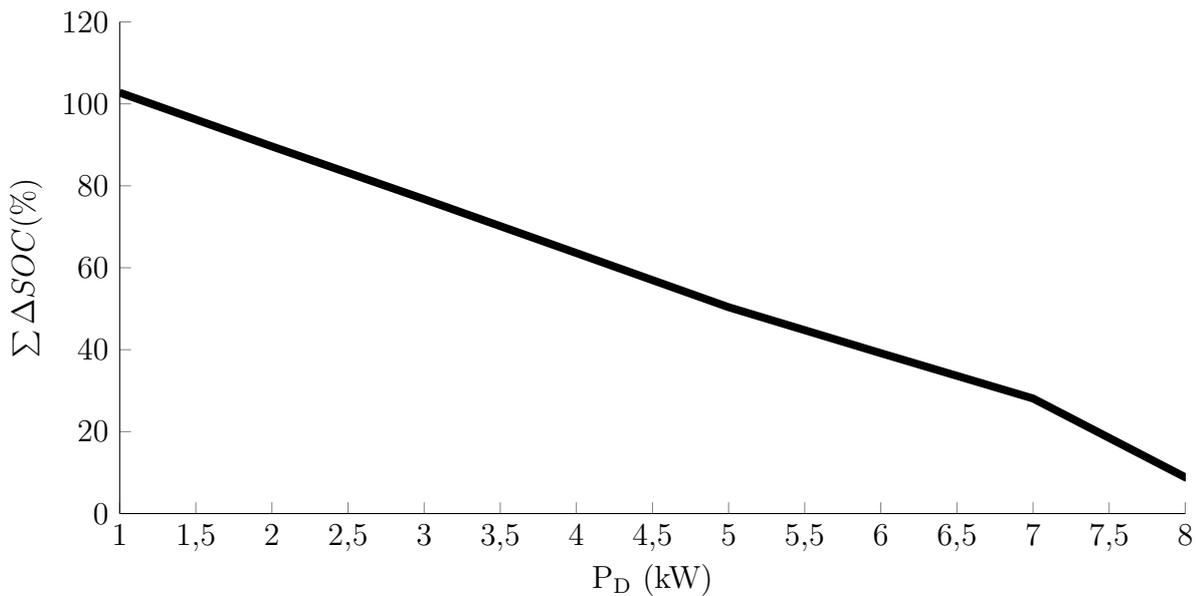


Figura 14 – Somatório de todos os ΔSOC com a variação de P_D .

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4 Estratégia de otimização

Para a aplicação do método de otimização, utilizou-se o alimentador teste de 34 barras do IEEE *Power & Energy Society* disponível em PES (2010) e representado esquematicamente na Figura 15. Esta rede teste é um sistema típico de distribuição, sendo um alimentador real no Arizona, nos EUA, com tensão nominal de 24,9 kV. Caracteriza-se por ser radial, muito longa, levemente carregada, com dois reguladores de tensão, um transformador reduzindo a tensão para 4,16 kV para uma pequena parcela do alimentador, cargas desequilibradas tanto distribuídas como concentradas, e capacitores *shunt*. Os parâmetros do alimentador utilizado também estão disponíveis em PES (2010).

Alocaram-se nove frotas de veículos elétricos híbridos *plug-in* nos nós 810, 822, 826, 864, 856, 890, 848, 838 e 840, conforme representado na Figura 16, onde também apresentam-se as potências mínimas e máximas utilizadas para cada frota. Cada frota é gerenciada por um agregador e os nove agregadores, por sua vez, comunicam-se com o COD.

O controle da taxa de recarga dos VEHPs é realizado em cada agregador com base no controlador fuzzy e utilizando os valores de potência recebidos do COD. No COD está a estratégia de otimização que define os valores de potência para cada agregador, dentro do intervalo das potências mínima e máxima, com base nas condições do sistema visando minimizar as perdas elétricas. A função objetivo e as restrições utilizadas foram apresentadas nas Equações (4.4) e (4.5).

O OpenDSS é um software específico para simulação de sistemas de distribuição de energia elétrica, auxiliando na integração de recursos distribuídos e na modernização da rede elétrica para um ambiente *smart grid*. Dentre suas principais funcionalidades, ele permite a integração de suas simulações com outras ferramentas computacionais.

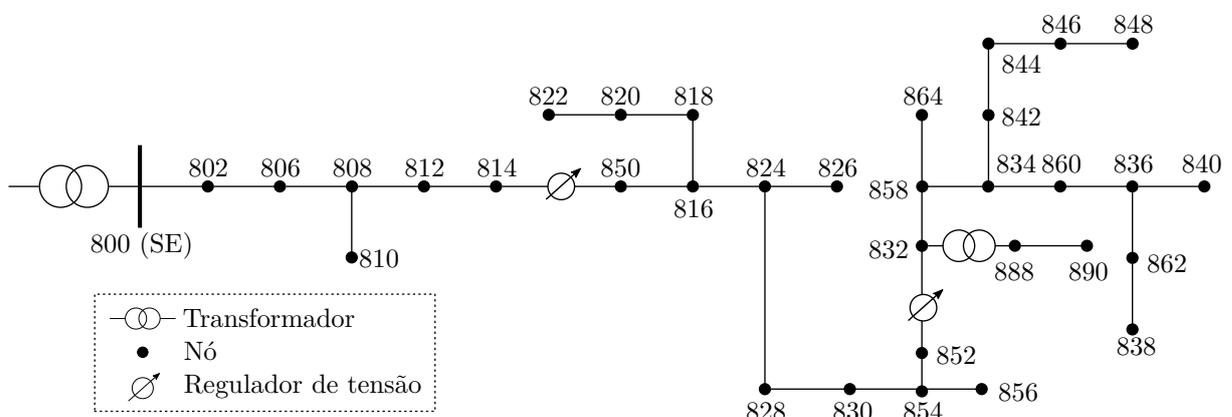


Figura 15 – Alimentador teste IEEE 34 barras utilizado para as simulações.

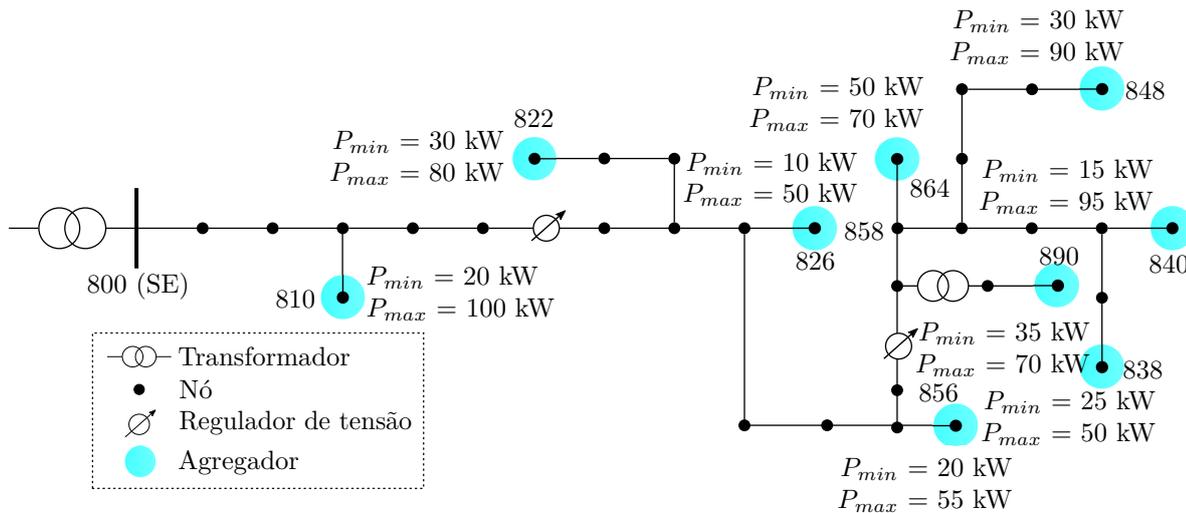


Figura 16 – Frotas de VEHPs alocadas e suas respectivas potências mínima e máxima no alimentador teste.

Fonte: Adaptado de PES (2010).

O primeiro resultado extraído consistiu em computar o fluxo de potência da rede elétrica teste pelo OpenDSS sem a inserção de nenhum veículo elétrico híbrido *plug-in*. Obteve-se 273,3 kW de perdas elétricas nas linhas e transformadores. Neste caso, as perdas representaram 15,44% do total da carga do circuito.

Após, atribuíram-se os valores das potências mínimas para cada agregador, obtendo um total de 355,9 kW de perdas elétricas, com a execução do fluxo de potência. As perdas representaram um total percentual de 17,93% de toda a carga instalada. A potência demandada para todos os nove agregadores totaliza 235 kW, sendo o somatório das potências mínimas de cada frota. Com esse valor demandado, a inserção dos VEHPs representa 11,84% de toda a carga instalada.

Em terceiro lugar, computou-se o fluxo de potência da rede elétrica considerando a potência máxima para cada agregador. Nesta etapa, obteve-se 575,2 kW de perdas totais no circuito, representando 24,45% da carga total do circuito. Neste cenário, a potência total demandada pelos agregadores totalizou 660 kW, sendo a soma de todas as potências máximas das nove frotas. A inserção dos VEHPs representa 28,06% de toda a carga instalada no alimentador.

Dos três casos simulados anteriormente, verifica-se que as perdas elétricas são crescentes conforme a penetração de VEHPs vai aumentando. As perdas representavam 15,44% no primeiro cenário sem VEHPs, subindo para 17,93% no caso com as frotas requisitando potência mínima e, por fim, 24,45% no cenário com potências máximas. A Tabela 6 apresenta um resumo das perdas obtidas para cada caso comentado anteriormente sem a estratégia de otimização.

A aplicação da estratégia de otimização busca obter valores de potências para os

Tabela 6 – Dados obtidos para os três casos sem otimização.

	Sem VEHP	Agregadores recebendo potência mínima	Agregadores recebendo potência máxima
$\sum P_D$ (kW)	0	235	660
$\sum P_D$ (%)	0	11,84	28,06
Perdas totais (kW)	273,30	355,90	575,20
Perdas totais (%)	15,44	17,93	24,45

Fonte: Elaborado pelo autor.

agregadores, dentro dos limites mínimos e máximos de cada um, de forma a minimizar as perdas elétricas totais do circuito. Logo, é esperado que as perdas não serão menores que o segundo caso base simulado anteriormente, onde cada agregador recebe sua potência mínima demandada.

Além disso, a demanda total de todos os agregadores deverá ficar entre o valor requisitado com as potências mínimas e o valor exigido com as potências máximas, nos casos 2 e 3, respectivamente. Ou seja, o total da demanda requisitada para os agregadores estará entre 235 kW e 660 kW.

Com a estratégia de otimização implementada no MATLAB® e a rede elétrica teste descrita e solucionada no OpenDSS, atribuíram-se diferentes valores de potências para cada agregador. Para cada conjunto de potências dos nove agregadores, computou-se o fluxo de potência e armazenou-se os valores das perdas elétricas totais.

Das simulações feitas, selecionaram-se três casos otimizados para comparação. Os principais dados extraídos de cada caso são apresentados na Tabela 7. Nela, são indicadas as potências atribuídas para cada agregador, o somatório da potência total demandada pelos agregadores, a porcentagem de inserção dos VEHPs em relação a carga total instalada, as perdas totais do circuito e as perdas totais percentuais.

O caso otimizado 1 da Tabela 7 foi o que retornou as menores perdas totais do circuito para as simulações feitas. Ele resultou em 379,03 kW, representando 18,30% de toda a carga instalada. A demanda total requisitada pelos agregadores foi de 336,43 kW, contabilizando 16,24% da carga instalada.

Comparando o caso otimizado 1 com o caso sem otimização em que a potência máxima foi entregue aos VEHPs, as perdas foram reduzidas em mais de 6%. Já, comparando o primeiro caso otimizado com o caso sem otimização em que as potências mínimas foram atribuídas, as perdas aumentaram em 0,37%. Assim, a estratégia de otimização reduziu as perdas do circuito comparando com a potência máxima entregue em cada agregador e aproximou-se no caso onde a potência mínima foi definida para cada frota, sendo estes dois últimos casos não otimizados.

Tabela 7 – Dados obtidos para os três casos com otimização.

	Caso otimizado 1	Caso otimizado 2	Caso otimizado 3
P_{810} (kW)	70,66	91,92	96,04
P_{822} (kW)	30,33	47,68	53,00
P_{826} (kW)	18,60	14,70	21,51
P_{864} (kW)	51,60	61,40	51,69
P_{856} (kW)	25,70	50,63	40,38
P_{848} (kW)	38,20	47,20	40,36
P_{890} (kW)	38,05	32,50	34,39
P_{838} (kW)	26,80	28,56	39,51
P_{840} (kW)	36,51	21,03	37,96
$\sum P_D$ (kW)	336,45	395,81	414,84
$\sum P_D$ (%)	16,24	18,58	19,31
Perdas totais (kW)	379,03	395,62	399,11
Perdas totais (%)	18,30	18,57	18,58

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os outros dois casos otimizados da Tabela 7 mostram que valores similares de perdas também foram observados nas simulações, entretanto, ambas as perdas foram maiores do que no caso otimizado 1. Para o caso otimizado 2, as perdas foram 395,62 kW, representando 18,57% da carga total. E no caso otimizado 3, as perdas foram 399,11 kW, sendo 18,58% da carga total instalada.

Verifica-se também que, apesar dos três casos possuírem valores de perdas percentuais similares, a potência total calculada para as frotas difere mais significativamente, sendo 336,45 kW no caso 1, 395,62 kW no caso 2 e 414,84 kW no caso 3, representando, respectivamente, 16,24%, 18,58% e 19,31% da carga total. Com isso, além de minimizar as perdas elétricas, pode-se também buscar a maximização da energia total entregue às frotas.

Em adição, pode-se incluir a minimização do tempo de recarga com base nas prioridades inseridas pelos consumidores. Implicando que agregadores com alta densidade de prioridades também terão preferência para receber energia da rede elétrica. Assim, frotas com VEHPs com prioridades mais elevadas do que outros agregadores também levarão esta alta prioridade para o COD, que computará um valor de potência incrementado na estratégia de otimização.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho desenvolveu um sistema para o controle da recarga de veículos elétricos híbridos *plug-in* visando o benefício do sistema elétrico de potência. As principais variáveis da metodologia proposta foram os estados de carga da bateria, o período de conexão para recarga, a prioridade do consumidor e os parâmetros da rede elétrica teste.

A primeira seção de resultados apresentou uma frota de VEHPs se recarregando, onde verificou-se que o sistema respondeu de forma inteligente e controlada aos pedidos de recarga. Verificou-se também que o cálculo das taxas de recarga foram efetuadas de acordo com os estados dos veículos e prioridades dos consumidores, correspondendo com o objetivo inicial.

Na sequência, correlacionou-se diretamente a influência da prioridade inserida pelo consumidor na atualização do estado de carga da bateria. Dado o deslocamento apresentado no eixo y, verificou-se que uma prioridade maior implica em uma taxa de recarga maior e, conseqüentemente, uma SOC sendo atualizado mais rápido.

Como a potência disponibilizada pelo COD também é utilizada para o cálculo da taxa de recarga de cada VEHP, verificou-se sua influência, na terceira seção de resultados. Nela, constatou-se que quanto mais potência é fornecida para o agregador, menor é tempo necessário para recarregar os veículos.

Por último, testou-se a importância da estratégia de otimização no alimentador teste do IEEE de 34 barras. Foi observado que a técnica aplicada reduziu as perdas elétricas no circuito, sendo seu valor percentual próximo ao do caso sem otimização com as potências mínimas atribuídas para cada frota. Entretanto, no caso otimizado, a potência total entregue aos VEHPs é maior do que o caso sem otimização.

Assim, com todos os resultados obtidos e analisados, verificou-se que o sistema de controle da recarga dos VEHPs atuou de forma inteligente e controlada, minimizando as perdas elétricas e cumprindo com o objetivo geral da metodologia proposta.

O sistema de recarga desenvolvido é baseado no controlador fuzzy, sendo que este é composto por diversos parâmetros, como funções de pertinência e conjunto de regras. A escolha destes parâmetros é um processo empírico, sendo embasado por algumas recomendações iniciais.

Dessa forma, o sistema responde apropriadamente para resolver o problema apresentado considerando os parâmetros escolhidos. Isso garante que o sistema é inteligente e otimizado para o escopo deste trabalho. Entretanto, comprovar que os parâmetros escolhidos são os melhores é uma afirmação difícil de se provar, dadas a infinidade de

combinações e possibilidades que podem ser alcançadas. Um exemplo, são as funções de pertinência dos processos de fuzzificação e defuzzificação: é possível que existam outras combinações de funções que possam ser mais adequadas para a aplicação, mas as escolhidas e utilizadas neste projeto garantiram a eficiência do sistema.

Um outro ponto a ser considerado é que a metodologia desenvolvida não ajusta a recarga dos VEHPs para ser realizada antes do tempo de desconexão da rede elétrica. Isto significa que os veículos com prioridades mais elevadas não terão suas recargas finalizadas antes do tempo de desconexão.

6.1 Trabalhos futuros

Para a continuidade deste trabalho, sugere-se:

- Aplicar um outro método de otimização no COD com outras funções objetivo, como maximizar a energia entregue aos VEHPs e maximizar os lucros do agregador e do consumidor;
- Utilizar o sistema desenvolvido para a prestação de serviços auxiliares para o sistema elétrico de potência, como regulação de frequência e tensão;
- Adaptar a metodologia proposta para possibilitar o fluxo de potência bidirecional, permitindo que o VEHP também forneça energia para a rede elétrica.

6.2 Publicações

Relacionados a este estudo, publicações em eventos nacionais e internacionais foram feitas, conforme citados abaixo:

- SALDANHA, J. J. A. ; MELLO, A. P. C. ; KOCKAR, I. ; SPERANDIO, M. Control Algorithm for Charging of Plug-In Electric Vehicles: Intelligent System. In: *50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC 2015)*, 2015, Stoke-on-Trent. UPEC 2015, 2015.
- SPERANDIO, M.; SALDANHA, J. J. A.; BASSO, C. O Impacto dos Veículos Elétricos Plug-In no Sistema de Transmissão. In: *XIX Congresso Brasileiro de Automática*. Campina Grande, 2012. p. 1–6.
- SALDANHA, J. J. A.; MELLO, A. P. C. Controle da Recarga de Veículos Elétricos Híbridos Plug-In Visando o Benefício do Sistema Elétrico de Potência. In: *VII Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão*. Alegrete, 2015.

Um artigo, também fruto deste trabalho, foi submetido para publicação e apresentação no Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE) de 2016, a ser realizado em Natal, no Rio Grande do Norte.

REFERÊNCIAS

- AHMAD, M. R.; OTHMAN, M. M. Optimal Charging Strategy for Plug-in Hybrid Electric Vehicle Using Evolutionary Algorithm. In: *IEEE International Power Engineering and Optimization Conference*. Langkawi: IEEE, 2014. p. 557–562. ISBN 9781479924226.
- ANSARI, M.; AL-AWAMI, A. T.; SORTOMME, E.; ABIDO, M. A. Coordinated Bidding of Ancillary Services for Vehicle-to-Grid Using Fuzzy Optimization. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 6, n. 1, p. 261–270, 2015.
- AXSEN, J.; KURANI, K. S. Anticipating plug-in hybrid vehicle energy impacts in California: Constructing consumer-informed recharge profiles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Elsevier Ltd, v. 15, n. 4, p. 212–219, 2010. ISSN 13619209. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2010.02.004>>.
- BAI, X.; QIAO, W. Robust Optimization for Bidirectional Dispatch Coordination of Large-Scale V2G. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 6, n. 4, p. 1944–1954, 2015.
- BARAN, R.; LEGEY, L. F. L. Veículos elétricos: história e perspectivas no Brasil. *XIII Congresso Brasileiro de Energia*, v. 33, p. 207–224, 2010. Disponível em: <http://www.bndespar.com.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes{_}pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/set3306>.
- BASSO, C. *O Impacto dos Veículos Elétricos Plug-In no Sistema Elétrico de Potência*. Alegrete: UNIPAMPA, 2011. 66 p. Disponível em: <https://docs.google.com/open?id=0B13shT{_}nfa0DaURkVTVQZjhl>.
- BRINKMAN, N.; WANG, M.; WEBER, T.; DARLINGTON, T. *Well-to-Wheels Analysis of Advanced Fuel/Vehicle Systems - A North American Study of Energy Use, Greenhouse Gas Emissions, and Criteria Pollutant Emissions*. [S.l.], 2005. Disponível em: <<http://www.transportation.anl.gov/pdfs/TA/339.pdf>>.
- CHAN, C. C. An overview of electric vehicle technology. *Proceedings of the IEEE*, v. 81, n. 9, p. 1202–1213, 1993. ISSN 00189219.
- CHAN, C. C.; BOUSCAYROL, A.; CHEN, K. Electric, Hybrid, and Fuel-Cell Vehicles: Architectures and Modeling. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 59, n. 2, p. 589–598, 2010.
- CLEMENT-NYNS, K.; HAESSEN, E.; DRIESEN, J. The impact of Charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 25, n. 1, p. 371–380, 2010. ISSN 08858950.
- De Los Ríos, A.; GOENTZEL, J.; NORDSTROM, K. E.; SIEGERT, C. W. Economic analysis of Vehicle-to-Grid (V2G)-enabled fleets participating in the regulation service market. In: *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies*. Washington, DC: IEEE, 2012. p. 1–8. ISBN 9781457721588.

- DENHOLM, P.; KUSS, M.; MARGOLIS, R. M. Co-benefits of large scale plug-in hybrid electric vehicle and solar PV deployment. *Journal of Power Sources*, Elsevier B.V., v. 236, p. 350–356, 2013. ISSN 03787753. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.10.007>>.
- DUVALL, M.; KNIPPING, E. *Environmental Assessment of Plug-In Hybrid Electric Vehicles - Volume 1: Nationwide Greenhouse Gas Emissions*. Palo Alto, CA, 2007. v. 1, 56 p.
- ELNOZAHY, M. S.; SALAMA, M. M. a. A comprehensive study of the impacts of PHEVs on residential distribution networks. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, v. 5, n. 1, p. 332–342, 2014. ISSN 19493029.
- GAN, L.; TOPCU, U.; LOW, S. Optimal decentralized protocol for electric vehicle charging. In: *IEEE Conference on Decision and Control*. Orlando, FL: IEEE, 2013. p. 5798–5804. ISBN 9781612848006. ISSN 08858950.
- GAO, Y.; CHEN, Y.; WANG, C. Y.; LIU, K. J. R. Optimal contract design for ancillary services in vehicle-to-grid networks. In: *IEEE 3rd International Conference on Smart Grid Communications*. Tainan: IEEE, 2012. p. 79–84. ISBN 978-1-4673-0910-3.
- GENG, B.; MILLS, J. K.; SUN, D. Two-stage charging strategy for plug-in electric vehicles at the residential transformer level. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 4, n. 3, p. 1442–1452, 2013. ISSN 19493053.
- GHOFRANI, M.; ARABALI, A.; GHAYEKHLOO, M. Optimal charging/discharging of grid-enabled electric vehicles for predictability enhancement of PV generation. *Electric Power Systems Research*, Elsevier B.V., v. 117, p. 134–142, 2014. ISSN 03787796. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378779614003046>>.
- GIGLIOLI, R.; GIUNTOLI, M.; LUTZEMBERGER, G.; POLI, D. Impact of a large fleet of EVs on the efficiency and reliability of an electric power system. In: *IEEE International Electric Vehicle Conference*. Florence: IEEE, 2014. p. 1–7. ISBN 9781479960750.
- GUILLE, C.; GROSS, G. A conceptual framework for the vehicle-to-grid (V2G) implementation. *Energy Policy*, Elsevier, v. 37, n. 11, p. 4379–4390, 2009. ISSN 03014215. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2009.05.053>>.
- HADDADIAN, G.; KHALILI, N.; KHODAYAR, M.; SHAHIDEHPOUR, M. Optimal scheduling of distributed battery storage for enhancing the security and the economics of electric power systems with emission constraints. *Electric Power Systems Research*, Elsevier B.V., v. 124, p. 152–159, 2015. ISSN 03787796. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378779615000620>>.
- HAJFOROOSH, S.; MASOUM, M. a.S.; ISLAM, S. M. Real-time charging coordination of plug-in electric vehicles based on hybrid fuzzy discrete particle swarm optimization. *Electric Power Systems Research*, Elsevier B.V., v. 128, p. 19–29, 2015. ISSN 03787796. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378779615001959>>.
- HALBLEIB, A.; TURNER, M.; NABER, J. Control of battery electric vehicle charging for commercial time of day demand rate payers. In: *2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, ISGT 2012*. Washington, DC: IEEE, 2012. p. 1–5. ISBN 9781457721588.

- HAN, S.; HAN, S.; SEZAKI, K. Development of an optimal vehicle-to-grid aggregator for frequency regulation. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 1, n. 1, p. 65–72, 2010. ISSN 19493053.
- HU, J.; YOU, S.; LIND, M.; ØSTERGAARD, J. Coordinated charging of electric vehicles for congestion prevention in the distribution grid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 5, n. 2, p. 703–711, 2014. ISSN 19493053.
- ILIĆ, D.; KARNOUSKOS, S.; BEIGL, M. Improving accuracy of energy forecasting through the presence of an electric vehicle fleet. *Electric Power Systems Research*, v. 120, p. 32–38, 2015. ISSN 03787796. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378779614003629>>.
- IPAKCHI, A.; ALBUYEH, F. Grid of the future. *IEEE Power and Energy Magazine*, v. 7, n. 2, p. 52–62, 2009. ISSN 15407977.
- JIAN, L.; XUE, H.; XU, G.; ZHU, X.; ZHAO, D.; SHAO, Z. Y. Regulated charging of plug-in hybrid electric vehicles for minimizing load variance in household smart microgrid. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 60, n. 8, p. 3218–3226, 2013. ISSN 02780046.
- JIANG, C.; TORQUATO, R.; SALLES, D.; XU, W. Method to assess the power-quality impact of plug-in electric vehicles. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 29, n. 2, p. 958–965, 2014. ISSN 08858977.
- JIN, C.; TANG, J.; GHOSH, P. Optimizing electric vehicle charging: A customer’s perspective. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 62, n. 7, p. 2919–2927, 2013. ISSN 00189545.
- JIN, C.; TANG, J.; GHOSH, P. Optimizing electric vehicle charging with energy storage in the electricity market. *Smart Grid, IEEE Transactions on*, v. 4, n. 1, p. 311–320, 2013.
- JOURABCHI, J. *Impact of plug-in hybrid vehicles on Northwest power system: a preliminary assessment*. Portland, OR, 2008.
- KAGAN, N.; SCHMIDT, H. P.; OLIVEIRA, C. C. B. de; KAGAN, H. *Métodos de otimização aplicados a sistemas elétricos de potência*. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2009. 216 p. ISBN 9788521204725.
- KAVOUSI-FARD, A.; MEMBER, S.; ROSTAMI, M. A.; MEMBER, S. Reliability-Oriented Reconfiguration of Vehicle-to-Grid Networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 11, n. 3, p. 682–691, 2015.
- KEMPTON, W.; TOMIĆ, J. Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue. *Journal of Power Sources*, v. 144, n. 1, p. 268–279, 2005. ISSN 03787753.
- KEMPTON, W.; TOMIĆ, J. Vehicle-to-grid power implementation: From stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy. *Journal of Power Sources*, v. 144, n. 1, p. 280–294, 2005. ISSN 03787753.
- KINTNER-MEYER, M.; SCHNEIDER, K.; PRATT, R. *Impacts Assessment of Plug-in Hybrid Vehicles on electric utilities and regional U.S. Power Grids*. Richland, WA, 2007. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.105.663{&}rep=rep1{&}ty>>.

- LIU, H.; HU, Z.; SONG, Y.; WANG, J.; XIE, X. Vehicle-to-Grid Control for Supplementary Frequency Regulation Considering Charging Demands. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 30, n. 6, p. 3110–3119, 2015.
- MANZ, D.; WALLING, R.; MILLER, N.; LAROSE, B.; D'AQUILA, R.; DARYANIAN, B. The Grid of the Future. *IEEE Power and Energy Magazine*, v. 12, n. 3, p. 26–36, 2014.
- MASOUM, A. S.; DEILAMI, S.; MEMBER, S.; MASOUM, M. A. S.; MEMBER, S. Fuzzy Approach for Online Coordination of Plug-In Electric Vehicle Charging in Smart Grid. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, v. 6, n. 3, p. 1112–1121, 2015.
- MASOUM, M. a. S.; MOSES, P. S.; HAJFOROOSH, S. Distribution transformer stress in smart grid with coordinated charging of plug-in electric vehicles. In: *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies*. Washington, DC: IEEE, 2012. p. 1–8. ISBN 9781457721588.
- MASRUR, M. A. Penalty for fuel economy-system level perspectives on the reliability of hybrid electric vehicles during normal and graceful degradation operation. *IEEE Systems Journal*, v. 2, n. 4, p. 476–483, 2008. ISSN 19328184.
- MATHWORKS. *Fuzzy inference process*. 2015. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/help/fuzzy/fuzzy-inference-process.html>>.
- MELIOPOULOS, S.; MEISEL, J.; COKKINIDES, G.; OVERBYE, T. *Power System Level Impacts of Plug-In Hybrid Vehicles*. Atlanta, Georgia, 2009. 86 p.
- MOSES, P. S.; MASOUM, M. a. S.; HAJFOROOSH, S. Overloading of distribution transformers in smart grid due to uncoordinated charging of plug-in electric vehicles. In: *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies*. Washington, DC: IEEE, 2012. p. 1–6. ISBN 9781457721588.
- NGUYEN, H. N. T.; ZHANG, C.; MAHMUD, A. Optimal Coordination of G2V and V2G to Support Power Grids With High Penetration of Renewable Energy. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, v. 1, n. 2, p. 188–195, 2015.
- OLIVEIRA, D. Q.; De Souza, A. C. Z.; DELBONI, L. N. Optimal plug-in hybrid electric vehicles recharge in distribution power systems. *Electric Power Systems Research*, Elsevier B.V., v. 98, p. 77–85, 2013. ISSN 03787796. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2012.12.012>>.
- ORTEGA-VAZQUEZ, M. A. Optimal scheduling of electric vehicle charging and vehicle-to-grid services at household level including battery degradation and price uncertainty. *IET Generation, Transmission & Distribution*, v. 8, n. 6, p. 1007–1016, 2014. ISSN 1751-8687. Disponível em: <<http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-gtd.2013.0624>>.
- PAPADOPOULOS, P.; JENKINS, N.; CIPCIGAN, L. M.; GRAU, I.; ZABALA, E. Coordination of the Charging of Electric Vehicles Using a Multi-Agent System. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 4, n. 4, p. 1802–1809, 2013. ISSN 1949-3053. Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84883893747&partnerID=40&md5=07bf07b4ba8042a60c17580b90>>.
- PES, I. *Distribution test feeders*. 2010. Disponível em: <<http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/>>.

- QIAN, K.; ZHOU, C.; ALLAN, M.; YUAN, Y. Modeling of load demand due to EV battery charging in distribution systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 26, n. 2, p. 802–810, 2011. ISSN 08858950.
- RAJABI, M.; ESMAILI, M. Optimal charging of plug-in electric vehicles observing power grid constraints. *IET Generation, Transmission & Distribution*, v. 8, n. 4, p. 583–590, 2014. ISSN 1751-8687. Disponível em: <<http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-gtd.2013.0628>>.
- RAMTEEN, S.; DENHOLM, P. Emissions Impacts and Benefits of Plug-In Hybrid Electric Vehicles and Vehicle-to-Grid Services Emissions Impacts and Benefits of Plug-In Hybrid Electric Vehicles and Vehicle-to-Grid Services. *Environmental Science & Technology*, v. 43, n. 4, p. 1199–1204, 2009.
- RAUTIAINEN, A.; MARKKULA, J.; REPO, S.; KULMALA, A.; JARVENTAUTA, P.; VUORILEHTO, K. Plug-in vehicle ancillary services for a distribution network. In: *8th International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies*. Monte Carlo: IEEE, 2013. p. 1–8. ISBN 9781467352703.
- REZNIK, L. *Fuzzy Controllers Handbook*. 1. ed. Newnes: Oxford, 1997. 240 p.
- ROSS, T. *Fuzzy logic with engineering applications*. 3. ed. Oxford: John Wiley & Sons, Inc., 2010. 606 p. ISBN 9780470743768.
- SAMARAS, C.; MEISTERLING, K. Life cycle assessment of greenhouse gas emissions from plug-in hybrid vehicles: implications for policy. *Environmental Science & Technology*, v. 42, n. 9, p. 3170–3176, 2008. ISSN 0013-936X.
- SHAABAN, M. F.; ISMAIL, M.; EL-SAADANY, E. F.; ZHUANG, W. Real-time PEV charging/discharging coordination in smart distribution systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 5, n. 4, p. 1797–1807, 2014. ISSN 19493053.
- SHAFIEE, S.; FOTUHI-FIRUZABAD, M.; RASTEGAR, M. Investigating the impacts of plug-in hybrid electric vehicles on power distribution systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 4, n. 3, p. 1351–1360, 2013. ISSN 1949-3053.
- SINGH, M.; MEMBER, S.; THIRUGNANAM, K.; MEMBER, S. Real-Time Coordination of Electric Vehicles to Support the Grid at the Distribution Substation Level. *IEEE Systems Journal*, v. 9, n. 3, p. 1000–1010, 2015.
- SOARES, F. J.; ALMEIDA, P. M. R.; LOPES, J. a. P. Quasi-real-time management of Electric Vehicles charging. *Electric Power Systems Research*, v. 108, p. 293–303, 2014. ISSN 03787796.
- SORTOMME, E.; EL-SHARKAWI, M. A. Optimal charging strategies for unidirectional vehicle-to-grid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 2, n. 1, p. 119–126, 2011. ISSN 19493053.
- SORTOMME, E.; EL-SHARKAWI, M. A. Optimal scheduling of vehicle-to-grid energy and ancillary services. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 3, n. 1, p. 351–359, 2012. ISSN 19493053.

SPERANDIO, M.; SALDANHA, J. J. A.; BASSO, C. O Impacto dos Veículos Elétricos Plug-In no Sistema de Transmissão. In: *XIX Congresso Brasileiro de Automática*. Campina Grande: [s.n.], 2012. p. 1–6.

STEPHAN, C. H.; SULLIVAN, J. Environmental and energy implications of plug-in hybrid electric vehicles. *Environmental Science & Technology*, v. 42, n. 4, p. 1185–1190, 2008.

SUNDSTRÖM, O.; BINDING, C. Flexible charging optimization for electric vehicles considering distribution grid constraints. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 3, n. 1, p. 26–37, 2012. ISSN 19493053.

TOMIĆ, J.; KEMPTON, W. Using fleets of electric-drive vehicles for grid support. *Journal of Power Sources*, v. 168, n. 2, p. 459–468, 2007. ISSN 03787753.

TUTTLE, D. P.; BALDICK, R. The evolution of plug-in electric vehicle-grid interactions. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 3, n. 1, p. 500–505, 2012. ISSN 19493053.

VANDAEL, S.; CLAESSENS, B.; HOMMELBERG, M.; HOLVOET, T.; DECONINCK, G. A scalable three-step approach for demand side management of plug-in hybrid vehicles. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 4, n. 2, p. 720–728, 2013. ISSN 19493053.

VELDMAN, E.; VERZIJLBERGH, R. a. Distribution Grid Impacts of Smart Electric Vehicle Charging From Different Perspectives. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 6, n. 1, p. 333–342, 2015. ISSN 1949-3053.

VITHAYASRICHAREON, P.; MILLS, G.; MACGILL, I. F. Impact of Electric Vehicles and Solar PV on Future Generation Portfolio Investment. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, v. 6, n. 3, p. 899–908, 2015.

VLIET, O. V.; BROUWER, A. S.; KURAMOCHI, T.; Van Den Broek, M.; FAAIJ, A. Energy use, cost and CO₂ emissions of electric cars. *Journal of Power Sources*, Elsevier B.V., v. 196, n. 4, p. 2298–2310, 2011. ISSN 03787753. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.09.119>>.

WANG, J.; LIU, C.; TON, D.; ZHOU, Y.; KIM, J.; VYAS, A. Impact of plug-in hybrid electric vehicles on power systems with demand response and wind power. *Energy Policy*, Elsevier, v. 39, n. 7, p. 4016–4021, 2011. ISSN 03014215. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2011.01.042>>.

WANG, Z.; WANG, S. Grid power peak shaving and valley filling using vehicle-to-grid systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 28, n. 3, p. 1822–1829, 2013. ISSN 08858977.

WARAICH, R. A.; GALUS, M. D.; DOBLER, C.; BALMER, M.; ANDERSSON, G.; AXHAUSEN, K. W. Plug-in hybrid electric vehicles and smart grids: Investigations based on a microsimulation. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 28, p. 74–86, 2013. ISSN 0968090X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2012.10.011>>.

WEIHAO, H.; SU, C.; CHEN, Z.; BAK-JENSEN, B. Optimal operation of plug-in electric vehicles in power systems with high wind power penetrations. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, v. 4, n. 3, p. 577–585, 2013. ISSN 1949-3029. Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84880261770&partnerID=40&md5=4168bdf909c45dce5c79de713e>>.

- WILLIAMSON, S.; EMADI, a. Comparative assessment of hybrid electric and fuel cell vehicles based on comprehensive well-to-wheels efficiency analysis. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 54, n. 3, p. 856–862, 2005. ISSN 0018-9545.
- WU, D.; CHAU, K. T.; LIU, C.; GAO, S.; LI, F. Transient stability analysis of SMES for smart grid with vehicle-to-grid operation. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 22, n. 3, 2012. ISSN 10518223.
- WU, D.; MEMBER, S.; ALIPRANTIS, D. C.; MEMBER, S.; GKRTZA, K. Electric Energy and Power Consumption by Light-Duty Plug-In Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 26, n. 2, p. 738–746, 2011. ISSN 0885-8950.
- YILMAZ, M.; KREIN, P. T. Review of the impact of vehicle-to-grid technologies on distribution systems and utility interfaces. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 28, n. 12, p. 5673–5689, 2013. ISSN 08858993.
- ZHANG, C.; CHEN, C.; SUN, J.; ZHENG, P.; LIN, X.; BO, Z. Impacts of Electric Vehicles on the Transient Voltage Stability of Distribution Network and the study of improvement measures. In: *IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*. Hong Kong: IEEE, 2014. p. 1–6. ISBN 9781479975372.
- ZOU, S.; LIU, X. A Distributed Charging Coordination for Large-Scale Plug-In Electric Vehicles Considering Battery Degradation Cost. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, v. 23, n. 5, p. 2044–2052, 2015.

APÊNDICE A – LÓGICA E SISTEMA DE INFERÊNCIA FUZZY

Este apêndice apresenta uma abordagem geral da lógica fuzzy e dos sistemas de inferência fuzzy. Primeiramente, apresenta-se a lógica fuzzy, expondo sua importância. Após, definem-se os conjuntos fuzzy, comparando-os com os conjuntos clássicos. Na sequência, a estrutura geral do sistema de inferência fuzzy é apresentada. Nela, expõem-se as relações entre as funções de pertinência, o método de defuzzificação e os processos de fuzzificação, defuzzificação e avaliação de regras. Após a exposição do sistema, as regras e as funções de pertinência são discutidas. Por fim, as interfaces de fuzzificação e defuzzificação são explicadas.

A.1 Lógica fuzzy

A lógica fuzzy estende a ideia da lógica Booleana, de apenas dois valores, para infinitos valores entre 0 e 1. Com essa extensão, ela permite lidar com o conceito de verdade parcial, onde não existem barreiras claramente definidas para uma dada variável. Com isso, sistemas altamente complexos com comportamento não totalmente claros e que precisam ser modelados, podem ser solucionados através da aplicação da lógica fuzzy.

A lógica fuzzy também pode ser utilizada para representar as variáveis linguísticas que expressam ideias subjetivas e que são interpretadas de formas diversificadas por diferentes indivíduos. Isso se dá devido ao fato de que grande parte da linguagem natural é difusa, com termos vagos e imprecisos. Assim, a lógica fuzzy apresenta-se como uma ferramenta para incorporar imprecisões, subjetividade e conhecimento humano na modelagem de sistemas complexos.

A.2 Conjuntos fuzzy

Na teoria clássica dos conjuntos, um elemento claramente pertence ou não pertence a um dado conjunto. Descreve-se essa pertinência pela Equação (A.1), onde o elemento x do universo X pertence ou não pertence ao conjunto A .

$$\chi_A(x) = \begin{cases} 1, & x \in A \\ 0, & x \notin A \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

Onde χ_A indica o grau de pertinência do elemento x no conjunto A e; \in e \notin representam, respectivamente, se o elemento está dentro ou não está dentro do conjunto.

O conceito fuzzy foi criado para estender a ideia de pertinência binária (pertence ou não pertence), através da inclusão de vários graus entre 0 e 1. Com 0 a expressar que o elemento não está dentro do conjunto e 1 que o elemento está totalmente dentro do conjunto. Mas agora, existem infinitos valores entre eles para representar a pertinência de um objeto em um dado conjunto. Matematicamente, a pertinência em um conjunto fuzzy é representada por (A.2).

$$\mu_{\underline{A}} \in [0, 1] \quad (\text{A.2})$$

Onde $\mu_{\underline{A}}$ é o grau de pertinência do elemento x no conjunto fuzzy \underline{A} , ou seja, o quão x é compatível com o conjunto \underline{A} . Assim, como um determinado elemento possui um valor de pertinência em um certo conjunto, ele pode pertencer a mais de um conjunto fuzzy com diferentes graus de pertinência em cada um.

Um exemplo ilustrando as pertinências para um conjunto clássico e um conjunto fuzzy é apresentado na Figura A.1. Verifica-se que, para o conjunto clássico, a pertinência do elemento no domínio $[a, b]$ é 1 para todo o intervalo. Assim, uma única função pode ser utilizada para representar esta relação, conforme ilustrado pela valor constante 1 entre a e b . Para o conjunto fuzzy, podem-se definir diferentes funções que descrevem a pertinência. Elas podem ser atribuídas, inclusive, começando antes de a e terminando após b . Isso é visualizado na Figura A.1, onde duas funções de pertinência são exemplificadas: uma trapezoidal (curva vermelha) e uma triangular (curva azul).

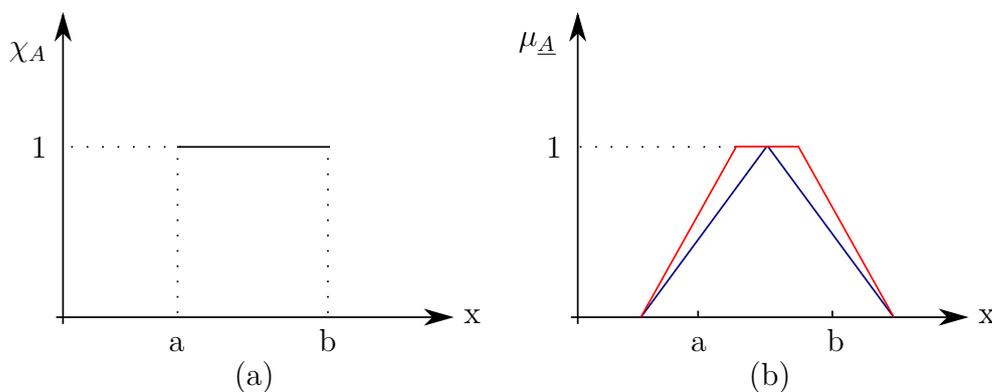


Figura A.1 – Exemplos de funções de pertinência para (a) conjunto clássico e (b) conjunto fuzzy.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A.3 Sistemas de inferência fuzzy

A aplicação da lógica fuzzy descrita anteriormente é realizada através de um sistema de inferência fuzzy. De forma geral, ele é uma ferramenta que mapeia um espaço de entrada em um espaço de saída, conforme ilustrado na Figura A.2.

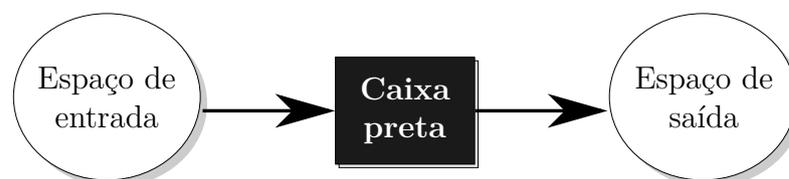


Figura A.2 – Arquitetura geral do mapeamento da entrada para a saída.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Este mapeamento acontece quando conhecem-se as entradas e as saídas do sistema e a relação entre elas. Isto significa que sabe-se qual saída é ativada para dada entrada. Com este conhecimento, a lógica fuzzy permite modelar o espaço de entrada para o espaço de saída na caixa preta.

O mecanismo que realiza esta modelagem é uma lista de condições SE-ENTÃO, chamada de regras. Estas regras relacionam-se diretamente as variáveis do sistema com os adjetivos que as descrevem. Por exemplo, se a temperatura da água está gelada então o cliente fica feliz. Assim, elas tornam-se vantajosas pois facilitam a descrição do conhecimento.

O diagrama que representa o processo geral de inferência de um sistema fuzzy é apresentado na Figura A.3. O método de inferência fuzzy interpreta os valores do vetor de entrada e , baseado em um conjunto de regras elaborado por um especialista¹, atribui valores para o vetor de saída.

A base de conhecimento contém as funções de pertinência, o conjunto de regras e o método de defuzzificação. As funções de pertinência convertem a entrada especificada em valores fuzzy no processo de fuzzificação; a entrada fuzzy é mapeada para a saída fuzzy através da avaliação da lista de regras e ; a saída precisa é obtida através do processo de defuzzificação, onde aplica-se um método matemático.

A.4 Regras SE-ENTÃO

O conhecimento para mapear o espaço de entrada no espaço de saída é feito através das condições do formato

¹ Especialista: indivíduo que conhece o comportamento do sistema, sabendo relacionar as entradas que disparam as respectivas saídas. Com este conhecimento, o especialista é capaz de elaborar regras para a inferência do sistema fuzzy.

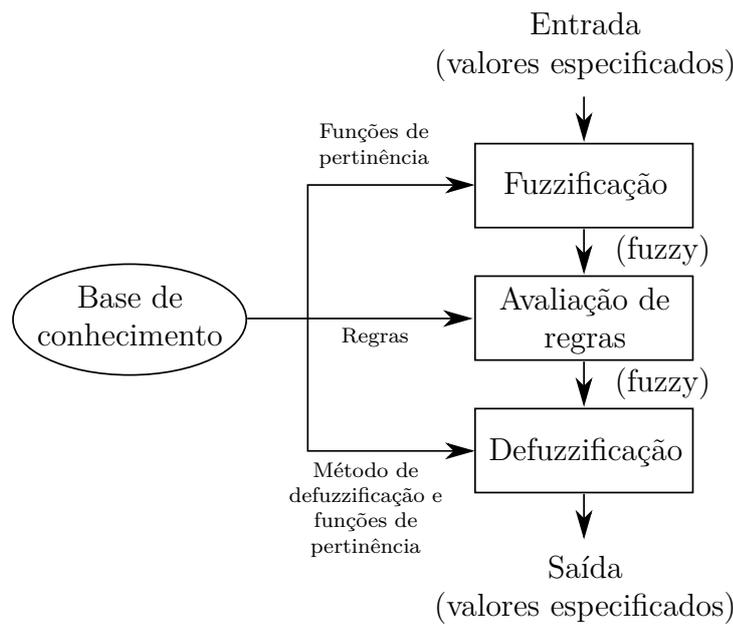


Figura A.3 – Descrição geral de um sistema de inferência fuzzy.

Fonte: Elaborado pelo autor.

SE x é A ENTÃO y é B.

A e B são variáveis linguísticas definidas por conjuntos fuzzy dentro dos domínios de X e Y , respectivamente. Esta forma condicional é conhecida como regra SE-ENTÃO. Ela representa uma inferência de um fato conhecido (o antecedente, premissa ou hipótese) inferindo, ou assimilando, um fato totalmente novo (o conseqüente).

Este tipo de representação expressa o raciocínio humano na sua própria linguagem de comunicação, facilitando a incorporação do conhecimento na lógica fuzzy.

As regras podem apresentar dois antecedentes, como em

SE x é A E y é B ENTÃO z é C.

Uma forma comum de representá-las é através de tabelas, conforme exposto na Tabela A.1.

Como exemplo, a Tabela A.1 pode ser interpretada da seguinte forma:

SE x é a_1 E y é b_1 ENTÃO z é c_{11} .

Um outro exemplo:

SE x é a_i E y é b_2 ENTÃO z é c_{i2} .

Tabela A.1 – Forma alternativa para representar as regras com dois antecedentes.

$x \backslash y$	b_1	b_2	\dots	b_j
a_1	c_{11}	c_{12}	\dots	c_{1j}
a_2	c_{21}	c_{22}	\dots	c_{2j}
\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots
a_i	c_{i1}	c_{i2}	\dots	c_{ij}

Fonte: Elaborado pelo autor.

A.5 Funções de pertinência

A função de pertinência é uma curva que define como cada valor no espaço de entrada é mapeado para um valor de pertinência, ou grau de pertinência, entre 0 e 1, ou seja, a função de pertinência é responsável por representar uma entrada precisa em um certo degrau de pertinência de um dado conjunto fuzzy. Estas funções podem ser normalmente descritas conforme apresentado na Figura A.4.

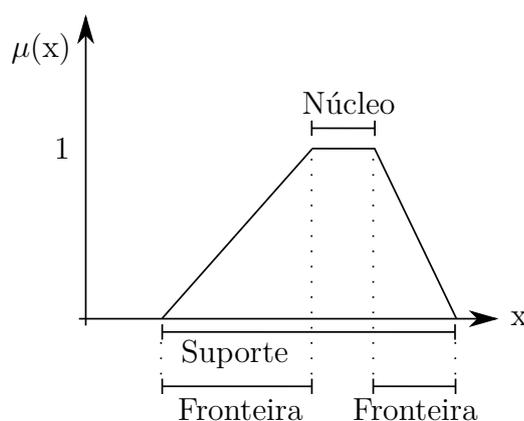


Figura A.4 – Características de uma função de pertinência.

Fonte: Adaptado de Ross (2010).

O núcleo define a região onde o elemento x faz totalmente parte do conjunto fuzzy. A região de suporte define que o elemento x não possui pertinência zero no conjunto. As fronteiras são as regiões que contem elementos que não são zeros mas também não pertencem completamente no conjunto, implicando que possuem pertinência entre 0 e 1.

A escolha das funções de pertinência para uma aplicação é um processo importante. De acordo com Reznik (1997), algumas observações devem ser seguidas para garantir a eficiência do sistema. Entre elas, o número de funções para uma certa variável, a posição das funções no plano Cartesiano, os comprimentos e suas formas. Entretanto, sabendo

que estas observações devem ser feitas, somente experiência profissional e senso comum ditarão uma escolha sábia.

Existem diversos tipos de funções de pertinência que podem ser escolhidas para representar conjuntos fuzzy. A Figura A.5 ilustra alguns dos tipos existentes, sendo elas: a função trapezoidal, a função triangular, a função Gaussiana e a função sigmoide.

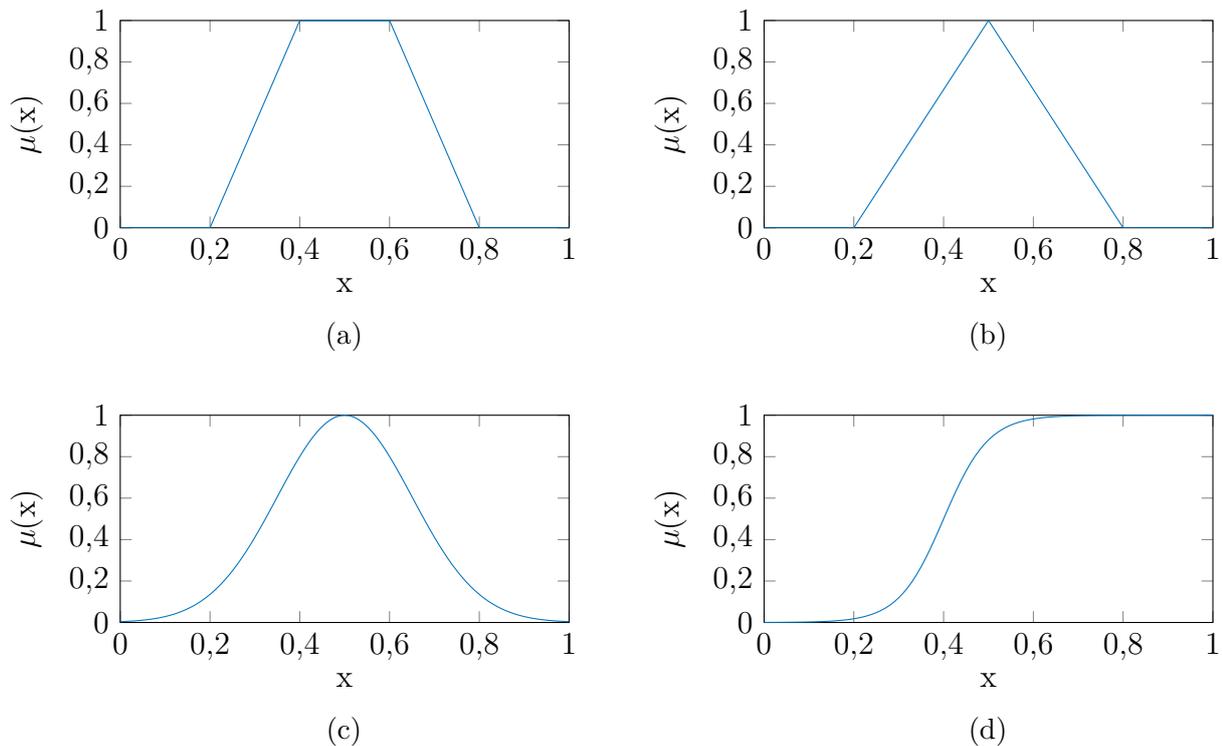


Figura A.5 – Funções de pertinência mais comuns: (a) trapezoidal, (b) triangular, (c) Gaussiana e (d) sigmoide.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A escolha de qual função será utilizada para um dado conjunto é baseada em experiência profissional e senso comum, em conjunto com diferentes testes utilizando diversificadas combinações.

Quando mais de um conjunto é inserido no universo de uma só variável, é importante que as funções vizinhas se sobreponham umas as outras para garantir que cada valor preciso retornará um grau de pertinência fuzzy.

A.6 Fuzzificação

Como discutido anteriormente, é necessário converter o valor preciso de uma determinada variável de entrada para um valor fuzzy. O processo de fuzzificação é o responsável por realizar esta tarefa, criando uma representação fuzzy a partir de um valor preciso.

A fuzzificação é realizada utilizando as funções de pertinência discutidas previamente neste apêndice. Como exemplo, considere que um sensor mensura o estado de carga (SOC) da bateria de um veículo elétrico *plug-in* em 40% (valor preciso). Sabe-se que as funções de pertinência para a variável de entrada SOC são representadas na Figura A.6. Pode-se então, converter a entrada precisa para os graus de pertinência de acordo com os conjuntos ativados. Para este caso, o SOC de 40% é 33% (0,33) pertencente ao conjunto fuzzy de SOC baixo e 50% (0,50) pertencente ao conjunto fuzzy SOC médio.

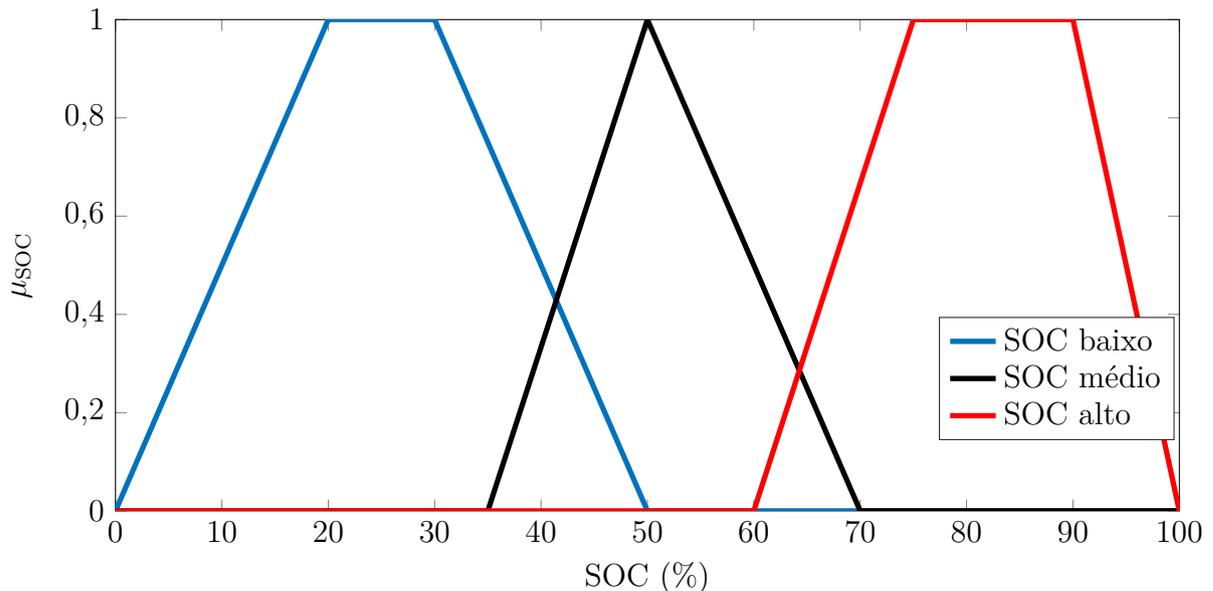


Figura A.6 – Exemplo de funções de pertinência representando três conjuntos fuzzy do estado de carga da bateria de um veículo elétrico *plug-in*.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A.7 Defuzzificação

O processo de defuzzificação converte uma saída fuzzy em uma única quantidade escalar. Isto significa que, em vez de retornar um conjunto fuzzy para na saída do sistema, um valor preciso será gerado.

Este processo é realizado através de métodos de defuzzificação. Cinco métodos são os mais utilizados na literatura, sendo eles: centroide, bissetor, MOM, LOM e SOM. Os mesmos são apresentados nas subseções seguintes.

A.7.1 Método centroide

Também conhecido como centro da área ou centro de gravidade, este método é dado pela Equação (A.3), e retorna o valor de p que representa o centro da área sob a

curva. Fisicamente interpretando, este valor é o centro de gravidade da figura geométrica.

$$p = \frac{\sum \mu_{\underline{A}} \times x}{\sum \mu_{\underline{A}}(x)} \quad (\text{A.3})$$

Onde p é o valor defuzzificado, $\mu_{\underline{A}}(x)$ é o grau de pertinência do elemento x no conjunto fuzzy \underline{A} e x é o elemento do universo X .

A.7.2 Método bissetor

Este método determina o elemento p onde as áreas em ambos seus lados são iguais. Em alguns casos, pode coincidir com o método centroide. A Equação (A.4) apresenta como a defuzzificação é realizada utilizando este método, onde deve-se encontrar um valor de p que satisfaça os dois lados da igualdade.

$$\int^p \mu(x)dx = \int_p \mu(x)dx \quad (\text{A.4})$$

A.7.3 Métodos SOM, MOM e LOM

Os três métodos, menor do máximo, meio do máximo e maior do máximo, do inglês *smallest-of-maximum*, *middle-of-maximum* e *largest-of-maximum*, respectivamente, levam em consideração que existe um platô no conjunto fuzzy de saída a ser defuzzificado.

Quando isto acontece, considera-se que a curva possui um platô no domínio de $x \in [a, b]$. O valor defuzzificado p de saída é apresentado nas Equações (A.5)-(A.7), para o SOM, MOM e LOM, respectivamente.

$$p = a \quad (\text{A.5})$$

$$p = \frac{a + b}{2} \quad (\text{A.6})$$

$$p = b \quad (\text{A.7})$$