



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

SAMUEL DIAS VASCONCELOS

**AVALIAÇÃO DA OPERAÇÃO E IMPACTOS ELÉTRICOS DA CONEXÃO DE
ELETROPOSTO DE RECARGA RÁPIDA**

Recife

2024

SAMUEL DIAS VASCONCELOS

**AVALIAÇÃO DA OPERAÇÃO E IMPACTOS ELÉTRICOS DA CONEXÃO DE
ELETROPOSTO DE RECARGA RÁPIDA**

Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Processamento de Energia.

Orientador: Prof. Dr. José Filho da Costa Castro.

Coorientador: Prof. Dr. Leonardo Rodrigues Limongi.

Recife

2024

Catálogo de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Vasconcelos, Samuel Dias.

Avaliação da operação e impactos elétricos da conexão de eletroposto de recarga rápida / Samuel Dias Vasconcelos. - Recife, 2024.

90f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2024.

Orientação: José Filho da Costa Castro.

Coorientação: Leonardo Rodrigues Limongi.

1. Qualidade de Energia; 2. Mobilidade Elétrica; 3. Impactos elétricos. I. Castro, José Filho da Costa. II. Limongi, Leonardo Rodrigues. III. Título.

UFPE-Biblioteca Central

SAMUEL DIAS VASCONCELOS

**AVALIAÇÃO DA OPERAÇÃO E IMPACTOS ELÉTRICOS DA
CONEXÃO DE ELETROPOSTO DE RECARGA RÁPIDA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, na área de concentração em Processamento de Energia.

Aprovada em: 26/01/2024

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ricardo Fonseca Buzo
(Examinador Externo)
Companhia Paulista de Força e Luz

Prof. Dr. Pedro André Carvalho Rosas
(Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Jose Filho da Costa Castro
(Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

RESUMO

O presente estudo almeja conduzir uma análise abrangente sobre os desafios enfrentados pelas redes elétricas urbanas diante do carregamento massivo de veículos elétricos (VEs). No atual contexto de uma sociedade constantemente voltada para a busca de soluções sustentáveis, a mobilidade elétrica surge como uma alternativa promissora para atenuar as emissões de gases de efeito estufa e reduzir a dependência de combustíveis fósseis.

No cenário atual da mobilidade elétrica, destaca-se o crescente interesse em veículos elétricos como resposta viável aos desafios ambientais e energéticos. A crescente demanda impõe a necessidade de gerenciar as implicações do carregamento massivo de VEs nas redes urbanas. Neste contexto, este trabalho descreve os desafios relacionados à mobilidade elétrica e suas repercussões nas infraestruturas elétricas urbanas, especificamente associados aos impactos elétricos na qualidade da energia decorrente da conexão de ERVEs à rede.

Os resultados são baseados em simulações implementadas em ambiente do tipo HIL (*Hardware in the loop*), evidenciando pontos de operação e as condicionantes para a ocorrência de impactos elétricos de estações de recarga rápida nas componentes de qualidade da energia estabelecidas pelo Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). Por fim, propõe-se um novo indicador específico, denominado de Índice de Impacto Elétrico do Carregamento de Veículos Elétricos - ECGII (*EV Charging Grid Impact Indice*).

O objetivo do ECGII é avaliar de maneira preditiva, em etapas anteriores à instalação de um novo carregador conectado à rede, o potencial de ocorrência de impactos do carregamento de VEs. Desta forma, o índice ECGII pode ser uma ferramenta destinada a gestores de redes elétricas urbanas e planejadores de transporte, desempenhando a função de classificador de modo a subsidiar estratégias que otimizem a integração dos veículos, garantindo, assim, eficiência energética e confiabilidade operacional, também contribui com a agilidade do processo de análise de conexão de ERVEs. Portanto, no contexto da crescente adoção da mobilidade elétrica, este trabalho busca contribuir com um método de suporte ao gerenciamento dos desafios enfrentados pelas redes elétricas urbanas em cenários de elevada inserção de cargas associadas potencialmente perturbadoras associadas à infraestrutura de recarga de VEs.

Palavras-chave: Carregadores, Impactos elétricos, Qualidade da Energia e Veículos Elétricos.

ABSTRACT

The present study aims to conduct a comprehensive analysis of the challenges faced by urban electrical grids in the face of the massive charging of electric vehicles (EVs). In the current context of a society constantly focused on seeking sustainable solutions, electric mobility emerges as a promising alternative to mitigate greenhouse gas emissions and reduce dependence on fossil fuels.

In the current scenario of electric mobility, the growing interest in electric vehicles as a viable response to environmental and energy challenges is evident. The increasing demand necessitates the need to manage the implications of massive EV charging on urban networks. In this context, this work describes the challenges related to electric mobility and its repercussions on urban electrical infrastructures, specifically associated with electrical impacts on power quality resulting from the connection of EVs to the grid.

The results are based on simulations implemented in a Hardware-in-the-Loop (HIL) environment, highlighting operating points and conditions for the occurrence of electrical impacts from fast charging stations on the power quality components established by the PRODIST standard (Electricity Distribution Procedure). Finally, a new specific indicator is proposed, called the Electric Vehicle Charging Grid Impact Index (ECGII).

The goal of the ECGII is to predictively assess, in stages prior to the installation of a new charger connected to the distribution network, the potential occurrence of impacts from EV charging. Thus, the ECGII index can be a tool for urban electrical network managers and planners, serving as a classifier to support strategies that optimize vehicle integration, ensuring energy efficiency and operational reliability. Therefore, in the context of the growing adoption of electric mobility, this work seeks to contribute with a method to support the management of challenges faced by urban electrical grids in scenarios of high insertion of potentially disruptive loads associated with EV charging infrastructure.

Keywords: Electric Mobility, Electric Vehicle Charging, Electrical Impacts, Quality of power.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de dedicar este trabalho a todas as fontes de inspiração que tornaram possível a realização deste mestrado. Em primeiro lugar, agradeço a Deus por me conceder força, sabedoria e perseverança ao longo desta jornada acadêmica.

À minha amada mãe e ao meu pai, expresso minha profunda gratidão. Seu apoio inabalável, amor e incentivo foram fundamentais para a minha conquista. Cada desafio foi superado com a segurança de saber que vocês estavam ao meu lado.

Ao Professor Leonardo Limongi, agradeço por ter me permitido embarcar nesta jornada de mestrado. E a confiança que depositou no meu trabalho, pelo suporte e acompanhamento durante o período, bem como abrir as portas para minha entrada no mestrado.

Aos amigos que estiveram presentes nos momentos de desafio, compartilhando palavras de encorajamento e proporcionando momentos de descontração quando o peso acadêmico parecia esmagador, meu sincero obrigado. Sua amizade foi o alento que manteve meu espírito resiliente e minha mente equilibrada.

Por fim, quero expressar meu agradecimento especial ao professor José Filho Castro. Sua orientação sábia, paciência incansável e comprometimento com a excelência acadêmica foram fundamentais para o sucesso deste projeto. Suas contribuições foram inestimáveis, e sou imensamente grato por sua mentoria ao longo deste processo.

A todos os mencionados e àqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, meu mais sincero obrigado. Este marco não seria possível sem o apoio incondicional de cada um de vocês.

Quero expressar também a minha profunda gratidão ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte valioso durante a realização deste mestrado. O financiamento e a bolsa concedidos pelo CNPq foram fundamentais para viabilizar esta pesquisa, proporcionando as condições necessárias para o desenvolvimento deste trabalho acadêmico.

Agradeço a oportunidade de conduzir meu trabalho de pesquisa no laboratório dedicado ao armazenamento e mobilidade (LAM). Importante ressaltar que este laboratório foi viabilizado por meio do financiamento providenciado pela CPFL Energia, através dos programas de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Gostaria de expressar meu especial agradecimento à Amanda Lopes Fernandes, bem como ao Ricardo Fonseca Buzo pelo valioso suporte oferecido, contribuindo significativamente com ideias para a pesquisa.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de blocos das principais componentes de estações de recarga	18
Figura 2 - Modelo básico de estação de recarga para bateria proposto em 1973.	19
Figura 3 -Topologia de carregamento de estação de recargar por conversores boost e buck.	20
Figura 4 -Topologia de carregamento de estação de recargar por conversores boost e half-bridge.	21
Figura 5 -Topologia de carregamento de estação de recargar por conversor ressonante.....	22
Figura 6 - Topologia de carregamento de estação de recarga por conversor CC/CC integrado aos conversores internos do veículo	23
Figura 7 - Modelagem de Veículos elétricos.....	25
Figura 8 - Funcionamento em 4 quadrantes do acionamento do VE.....	26
Figura 9 - Faixas de tensão.	32
Figura 10 - Classificação das VTCDs.	38
Figura 11 - Perfil de Carga durante carregamento de VE.....	41
Figura 12 - Emissão de <i>Flickes</i> durante 10 dias.	42
Figura 13 - Flutuação de tensão admissível e tolerância em função do tempo.....	43
Figura 14 - Evento de Carregamento Rápido.	44
Figura 15 - Variação de fator de potência em função da potência fornecida.....	44
Figura 16 - Injeção de Distorção Harmônica Total (THD) de corrente.....	45
Figura 17 - Composição Harmônica para potências de 50kW e 11 kW	46
Figura 18 – Tensão e Corrente para rede antes e depois do acoplamento de um sistema de armazenamento.....	47
Figura 19 - Eletroposto com Estações de Recarga Rápida com PV e BESS - Diagrama Simplificado.....	48
Figura 20 - Modelo de simulação inicial da operação do eletroposto.	49
Figura 21 - Modelo de representação em nível de chaveamento da rede elétrica	49
Figura 22 - Modelo de representação em nível de chaveamento da estação de recarga.	49
Figura 23 - Modelo de representação em nível de chaveamento do veículo elétrico.	50
Figura 24 - Modelo de simulação de eletroposto utilizado.....	50
Figura 25 - Painel de monitoramento do eletroposto.....	51
Figura 26 - Tensão de Linha na rede com carregador desconectado.....	52
Figura 27 - Tensão de Linha na rede para SOC 50%.	53
Figura 28 - Distribuição Harmônica da Tensão de Linha - para o modo com SoC 50%.....	54
Figura 29 - Corrente na rede para SOC de 50%.	54
Figura 30 - Distribuição Harmônica da Corrente para SOC 50%.	55
Figura 31 - Fator de Potência na rede para SOC 50%.....	55
Figura 32 - Tensão de Linha na rede para SOC 5%.	56
Figura 33 - Distribuição Harmônica da Tensão de Linha para SOC 5%.....	57
Figura 34 - Corrente na rede para SOC 5%.	57
Figura 35 - Distribuição Harmônica da Corrente para SOC 5%.	58
Figura 36 - Fator de Potência na rede para SOC 5%.	58

Figura 37 - Tensão de Linha na rede para SOC 95%.	59
Figura 38 - Distribuição Harmônica da Tensão de Linha para SOC 95%.	59
Figura 39 - Corrente na rede para SOC 95%.	60
Figura 40 - Distribuição Harmônica da Corrente para SOC 95%.	60
Figura 41 - Fator de Potência na rede para SOC 95%.	61
Figura 42 - Comportamento da rede para SOC 50% com carga fixa.	62
Figura 43 - Distribuição Harmônica para SOC 50% com carga fixa.	63
Figura 44 - Fator de Potência na rede para SOC 50%.	63
Figura 45 - Comportamento da rede para SOC 5% com carga fixa.	64
Figura 46 - Distribuição Harmônica para SOC 5% com carga fixa.	65
Figura 47 - Fator de Potência na rede para SOC 5%.	65
Figura 48 - Comportamento da rede para SOC 95% com carga fixa.	66
Figura 49 - Distribuição Harmônica para SOC 5% com carga fixa.	67
Figura 50 - Fator de Potência na rede para SOC 95%.	67
Figura 51 - $V_{pcc[rms]}$ x SCC.	72
Figura 52 - $V_{pcc[rms]}$ x Potência do Carregador.	73
Figura 53 - ECGII (SccPCC).	74
Figura 54 - ECGII (PCS).	74
Figura 55 - ECGII (THDv).	75
Figura 56 - ECGII (THDi).	75
Figura 57 - ECGII ($\cos\phi_{CS}$).	76
Figura 58 - ECGII (SccPCCxPCS).	76
Figura 59 - ECGII (THDvxTHDi).	77
Figura 60 - Distribuição em espectro de cor do ECGII.	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Níveis de Carregamento por faixa de Potência.	17
Tabela 2 - Faixas tensão para 380 V (entre fases).	32
Tabela 3 - Indicadores de Distorção Harmônica.....	34
Tabela 4 - Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental).....	35
Tabela 5 - Limite para o indicador Flutuação de Tensão.....	37
Tabela 6 - Classificação das variações de tensão de curta duração.	38
Tabela 7 -Estratificação das VTCD com base nos níveis de sensibilidade de diversas cargas.....	39
Tabela 8 - Fator de ponderação em função da região de sensibilidade.....	40
Tabela 9 - Pontos de Relevância do impacto elétrico da recarga de VEs.	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

VE	Veículo Elétrico
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
FP	Fator de Potência
PFC	<i>Power Factor Correction</i>
IME	Interferências Eletromagnéticas
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
QE	Qualidade da Energia elétrica
TR	Tensão de Referência
DRP	Duração Relativa da Transgressão de Tensão Precária
DRC	Duração Relativa da Transgressão de Tensão Crítica
IMT	Interrupção Momentânea de Tensão
AMT	Afundamento momentânea de Tensão
EMT	Elevação Momentânea de Tensão
IMT	Interrupção Temporária de Tensão
ATT	Afundamento Temporário de Tensão
ETT	Elevação Temporária de Tensão
VTCD	Variação de Tensão de Curta Duração
FI	Fator de Impacto
TC	Tensão Constante
BESS	<i>Battery Energy System Storage</i>
V2G	<i>Vehicle to Grid</i>
UPS	<i>Uninterruptible Power Supply</i>
VRP	<i>Indicator Voltage stability, Reliability, and Power loss</i>
PHEV	<i>Plug-in Hybrid Electric Vehicles</i>
BEV	<i>Battery Electric Vehicle</i>
FCEV	<i>Fuel Cell Electric Vehicle</i>
EVCSs	<i>Electric Vehicle Charging Stations</i>
REGs	<i>Renewable Energy Based Generators</i>
PV	<i>Photovoltaic</i>
WT	<i>Wind Turbine</i>

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	10
1.1	Qualidade da energia no contexto de mobilidade elétrica	11
	Objetivos Gerais e Específicos	14
1.2	14	
1.3	Estrutura da Dissertação	15
2.	MODELAGEM DE ESTAÇÕES DE RECARGA E VEÍCULOS ELÉTRICOS	16
2.1	Estações de Recarga para Veículos Elétricos.....	16
2.1.1	Estação de Recarga – Modelo simplificado.....	19
2.1.2	Estação de recarga com conversores boost e buck.....	19
2.1.3	Estação de recarga baseada em conversores <i>boost</i> e <i>half-bridge</i>	21
2.1.4	Estação de recarga baseada em conversor Ressonante	21
2.1.5	Estação de Recarga acoplada ao carregador interno do VE.....	22
2.2	Modelagem de Veículos Elétricos	24
2.2.1	Componentes dos Veículos Elétricos.....	24
2.3	Conclusões do Capítulo	29
3.	IMPACTOS ELÉTRICOS DA CONEXÃO DE ESTAÇÕES DE RECARGA.....	31
3.1	Variação de tensão em regime permanente.....	31
3.2	Fator de potência.....	33
3.3	Harmônicos	33
3.4	Desequilíbrio de tensão.....	35
3.5	Variação de frequência	36
3.6	Flutuação de tensão.....	36
3.7	Variação de Tensão de Curta Duração - VTCD.....	37
3.8	Impactos Elétricos decorrentes da Recarga de Veículos Elétricos	40
3.8.1	Flutuação de Tensão	41
3.8.2	Fator de Potência.....	43
3.8.3	Distorções Harmônicas	44
3.9	Conclusões do Capítulo	47
4.	SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO DO ELETROPOSTO	48
4.1	Estudo de Caso – Projeto Eletroposto Sustentável CS3059.....	48
4.2	Modelo de simulação do eletroposto.	49
4.3	Simulação da Operação com a Estação de Recarga desconectada.....	52
4.4	Carregamento em 50% do SoC no VE.....	53
4.5	Carregamento com SoC inicial do VE em 5%.....	56
4.6	Carregamento em 95% do VE	58

4.7	Efeito da Conexão de Estação de Recarga em Ponto de Conexão Compartilhado.....	61
4.7.1	Carregamento em 50% do VE com carga Fixa.....	62
4.7.2	Carregamento em 5% do VE com carga Fixa.....	64
4.7.3	Carregamento em 95% do VE com carga Fixa.....	66
5.	INDICADOR DE IMPACTOS ELÉTRICOS	69
5.1	Avaliação dos Impactos Elétricos	70
5.2	Proposta de indicador de Impactos Elétricos	73
6.	CONCLUSÕES	79
6.1	Trabalhos Futuros	80
6.2	Produção Científica.....	80
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	82

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos tem sido observada a intensificação do processo de eletrificação da mobilidade urbana, impulsionada por avanços tecnológicos e requisitos de sustentabilidade ambiental. No esforço de encontrar soluções inovadoras para os desafios do transporte nas cidades, os Veículos Elétricos (VEs) emergem como uma alternativa energeticamente eficiente aos sistemas tradicionais movidos a combustíveis fósseis (Nour *et al.*, 2020).

A transição em direção à mobilidade elétrica transcende a mera mudança no tipo de combustível utilizado; trata-se de uma mudança para um paradigma de transporte mais inteligente, limpo e resiliente. Os VEs, impulsionados por baterias elétricas, não apenas reduzem as emissões de gases de efeito estufa, mas também redefinem a relação entre a infraestrutura de transporte e o fornecimento de energia elétrica (Khalid *et al.*, 2019). Entretanto, a mudança não ocorre sem desafios substanciais. A integração massiva de VEs nas redes elétricas urbanas suscita questionamentos sobre a estabilidade e eficiência dos sistemas elétricos. O processo de carregamento dos VEs, em particular, desempenha um papel central, influenciando tanto a demanda de energia quanto a qualidade da eletricidade fornecida. Compreender e gerenciar os impactos elétricos resultantes torna-se crucial (Torquato *et al.*, 2017).

No contexto da eletrificação do setor de transportes, o propósito deste trabalho é preencher a lacuna existente na avaliação dos impactos elétricos do carregamento de VEs, ressaltando a importância do desenvolvimento de um indicador abrangente. Ao compreender os desafios enfrentados pelas redes elétricas urbanas devido à crescente presença de VEs, a pesquisa visa contribuir para uma compreensão dos desafios elétricos associados à mobilidade elétrica buscando promover o desenvolvimento de estratégias sustentáveis para a integração eficaz de VEs nas cidades do futuro. A abordagem visa não apenas resolver desafios imediatos, mas também antecipar e moldar um futuro urbano mais sustentável e eficiente em termos energéticos.

Os resultados foram obtidos no contexto de um projeto de inovação aprovado no programa de Pesquisa e Desenvolvimento (PD-00063-3059/2019) da Agência Nacional de Energia Elétrica chamada estratégica nº 022/2018, tendo como empresa proponente a CPFL Energia, e como executoras a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), a Moura Acumuladores, o Instituto de Tecnologia Edson Mororó Moura (ITEMM) e o Instituto Avançado de Tecnologia e Inovação (IATI).

1.1 Qualidade da energia no contexto de mobilidade elétrica

O artigo (Deb *et al.*, 2018) tem como meta compreender de forma abrangente as implicações de cargas elétricas causadas pelo carregamento de veículos elétricos na rede focando principalmente nos aspectos de estabilidade de tensão, perdas energéticas e confiabilidade. Para realizar a investigação, foi conduzido nesta dissertação uma análise minuciosa utilizando o sistema de teste IEEE 33 bus, reconhecido como um padrão representativo de uma rede de distribuição radial. Durante a análise foi identificado que o sistema é capaz de suportar a instalação de estações de recarga rápida em pontos com alta capacidade de curto-circuito, definidos como "pontos fortes". No entanto, a alocação das estações em pontos com baixa capacidade de curto-circuito, conhecidos como "pontos fracos" do sistema, demonstrou prejudicar a operação eficiente e estabilidade do sistema de energia.

Com base nos resultados, foi proposto a criação de um novo indicador, denominado Índice de Estabilidade de Tensão, Confiabilidade e Perda de Energia (VRP - *Indicator Voltage stability, Reliability, and Power loss*). Este índice é uma ferramenta para avaliar e otimizar o posicionamento estratégico das estações de recarga de VEs na rede de distribuição.

O VRP será composto por três parâmetros críticos: estabilidade, confiabilidade e perda técnica de energia no sistema elétrico. A confiabilidade, por exemplo, é fundamental, pois representa a probabilidade de que o sistema opere de maneira satisfatória ao longo de um período determinado e sob condições específicas, diretamente relacionadas à garantia da entrega de energia em locais específicos da rede. Outro parâmetro central é a estabilidade de tensão, que se refere à capacidade do sistema elétrico de manter tensões aceitáveis e estáveis em todos os pontos da rede, mesmo quando sujeito a perturbações externas. A instabilidade de tensão pode resultar em colapsos severos do sistema, justificando sua inclusão no indicador.

É importante observar que esta pesquisa apresentada em (Deb *et al.*, 2018) não aborda a avaliação de harmônicos gerados pela implementação de um sistema de carregamento de veículos elétricos, que, conforme verificado no artigos a seguir, se trata de um ponto de fundamentalmente relevância como também o fator de potência.

O artigo (Ahmadi *et al.*, 2019) explora os desafios e as soluções para melhorar a qualidade da energia em redes inteligentes com a presença de veículos elétricos (VEs). Os VEs podem ser conectados à rede, permitindo fluxo bidirecional de energia, o que gera impactos na qualidade da energia. O artigo revisa as condições atuais e futuras dos VEs, juntamente com trabalhos de pesquisa recentes sobre o tema. Discute-se os problemas causados pela conexão dos VEs à rede elétrica e propõe soluções para lidar com os desafios. O artigo também aborda

a capacidade dos VEs de fornecerem serviços à rede elétrica, conhecida como Vehicle-to-Grid (V2G). A capacidade pode ser utilizada para melhorar a qualidade da energia e a confiabilidade do sistema. Por exemplo, os VEs podem ser usados para regular a tensão e fornecer energia de reserva durante picos de demanda, no entanto este modelo de operação é proibida no Brasil.

Um dos principais pontos abordados no estudo é a qualidade da energia durante o carregamento dos VEs. A qualidade da energia é afetada principalmente por variações de tensão e frequência, desequilíbrio, interrupção, oscilação e harmônicos. Durante o carregamento os parâmetros são avaliados para garantir a qualidade e a estabilidade da rede elétrica.

O primeiro desafio é o impacto do carregamento dos VEs no perfil de tensão. O carregamento em massa pode causar flutuações na tensão, levando a problemas de qualidade da energia. Portanto, é importante implementar dispositivos de regulação de tensão e estratégias de coordenação na carga e descarga para mitigar os impactos. O desequilíbrio de Tensão é outra questão crítica relacionada à qualidade da energia durante o carregamento. A concentração de VEs com carregadores monofásicos em determinadas áreas pode gerar desequilíbrio nas correntes das fases, afetando a qualidade da energia. Para resolver o problema, estratégias de balanceamento de carga e monitoramento em tempo real podem ser adotadas.

Os harmônicos são outra preocupação importante durante o carregamento. Os conversores de energia utilizados nos VEs introduzem harmônicos na rede elétrica, afetando a qualidade da energia. Portanto, é importante desenvolver carregadores multifuncionais com recursos de detecção de harmônicos e filtragem ativa de energia quando necessário.

Em (Nour *et al.*, 2020), os impactos negativos do carregamento de veículos elétricos (VEs) nos sistemas elétricos são avaliados. O estudo aborda diferentes tipos de VEs, como híbridos plug-in (PHEVs-Plug-in Hybrid Electric Vehicles), veículos elétricos a bateria (BEVs-Battery Electric Vehicles) e veículos elétricos a célula de combustível (FCEVs-Fuel Cell Electric Vehicles). No que diz respeito às tecnologias de carregamento, são discutidos o carregamento condutivo, carregamento sem fio e a troca de bateria. No entanto, o foco principal está no carregamento não controlados e nos impactos negativos que ele pode trazer para o sistema elétrico.

Os impactos negativos do carregamento não controlado de VEs no sistema elétrico são principalmente o aumento do pico da demanda, distúrbios de tensão, desequilíbrio de fases, distorção harmônica, sobrecarga de equipamentos e aumento das perdas de energia. Diversas pesquisas evidenciam a necessidade de atualizações na infraestrutura elétrica e a importância do carregamento controlado para mitigar os impactos negativos.

Enquanto por outro lado, os resultados observados mostraram que, quando o carregamento e o descarregamento dos VEs são realizados de forma controlada, eles podem fornecer serviços importantes para o sistema elétrico. Os serviços incluem regulação de frequência, regulação de tensão, compensação de potência reativa, gerenciamento de congestionamento e melhoria da qualidade da energia. Os VEs têm potencial para contribuir significativamente para a otimização da rede elétrica.

Em (Farhoodnea *et al.*, 2013) é apresentada uma análise da Qualidade da energia dos sistemas de distribuição devido à alta penetração de estações de carregamento de veículos elétricos (EVCSs - *Electric Vehicle Charging Stations*) e geradores baseados em energias renováveis (REGs - *Renewable Energy Based Generators*). Usando um sistema de teste de 16 barras, foram realizadas simulações para avaliar os efeitos dos REGs e EVCSs em diferentes níveis de penetração, condições de carga e condições climáticas. Os resultados obtidos revelaram que a presença de alta penetração de EVCSs e REGs pode ter como consequência impactos significativos nos indicadores de qualidade da energia. Os principais resultados incluem:

- Flutuações de frequência excedendo os limites recomendados: Os sistemas PV (Photovoltaic) e WT (Wind Turbine) produziram flutuações de frequência que ultrapassaram 3% nos níveis mais altos de penetração;
- Queda de tensão em barramentos vizinhos: Os EVCSs causaram uma queda de tensão de até 2% em barramentos próximos devido ao alto consumo de energia;
- Desvio do fator de potência desejado: As trocas de energia entre os REGs e EVCSs resultaram em um desvio do fator de potência pretendido, mesmo com a presença de bancos de capacitores.
- Distorção harmônica além dos limites: A ausência de filtros harmônicos adequados nos inversores dos REGs e EVCSs resultou em uma distorção harmônica significativa. A distorção total de harmônicos de tensão (THD) e a distorção total de harmônicos de corrente (THDi) excederam os limites recomendados de 10% na análise realizada.

Os resultados indicam a necessidade de medidas adequadas para mitigar os problemas de Qualidade da energia decorrentes da maior utilização de EVCSs e REGs nos sistemas de distribuição. Ao implementar sistemas de carregamento de veículos elétricos e fontes de energia renovável, é importante considerar os impactos e adotar soluções como o uso de filtros harmônicos e o gerenciamento eficiente da geração e consumo de energia.

Em (Khalid *et al.*, 2019) é abordada uma descrição da infraestrutura de carregamento de veículos elétricos (VEs) e os diversos fatores de impactos na rede elétrica associados ao seu uso. É definido que o carregamento destes veículos apresenta duas modalidades principais de carregamento: condutivo e indutivo. O carregamento condutivo envolve a conexão física direta entre o VE e a rede elétrica, enquanto o carregamento indutivo é realizado sem contato físico.

Os principais desafios da conexão de carregamento destes veículos elétricos foram descritos principalmente focados na modalidade condutiva pois até o presente momento e a modalidade dominante os principais desafios para rede observados são as Interrupções no fornecimento de energia, harmônicos e desequilíbrio de tensão, sobrecarga de ativos do sistema e impacto na estabilidade do sistema como também alterações no fator de potência

Em resposta aos desafios, várias iniciativas e soluções têm sido propostas. o uso de medidores inteligentes para monitorar e controlar o carregamento de VEs, o desenvolvimento de filtros passivos para mitigar harmônicas e a implementação de algoritmos de controle avançados para manter a estabilidade do sistema.

Este trabalho de dissertação busca contribuir com o tema, apresentando uma estratégia de modelagem da infraestrutura de recarga, a análise dos pontos de operação críticos e uma proposta de indicador de impactos elétricos.

1.2 Objetivos Gerais e Específicos

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a operação de um eletroposto de recarga rápida, com ênfase na interação entre o sistema de recarga e a rede elétrica, a fim de mensurar os impactos elétricos de conexão de estações de recarga rápida e desenvolver estratégias de mitigação.

Em resumo, este trabalho tem os seguintes objetivos específicos:

- Modelar os principais equipamentos associados ao carregamento de veículos elétricos, como ênfase em estações de recarga rápida;
- Apresentar os principais indicadores de qualidade da energia associados a eletroposto para recarga de veículos elétricos;
- Avaliar por meio de simulação as interações entre a rede elétrica e eletroposto, no ponto de conexão, em termos de indicadores de impactos elétricos;

- Identificar os pontos de operação críticos durante o carregamento de veículos elétricos para antecipar possíveis violações de indicadores de qualidade da energia, e por fim,
- Propor um novo indicador de impactos elétricos considerando as principais grandezas associadas à operação de estações de recarga, tal como potência de curto-circuito no ponto de conexão, potência dos carregadores, entre outras variáveis.

1.3 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está estruturada da seguinte forma:

- No Capítulo 2 é apresentado o resumo do estado da arte referente as modelagens de estações de recarga e veículos elétricos apresentando as principais topologias utilizadas, bem como a descrição dos modelos utilizados em ferramentas de simulação.
- O Capítulo 3 apresentar uma síntese prospectiva de impactos elétricos da conexão de estações de recarga, expondo os principais indicadores de qualidade da energia que podem refletir aspetos operativos durante o processo de recarga de veículos elétricos.
- O Capítulo 4 descreve o modelo de simulação utilizado para a avaliação dos indicadores de qualidade pertinentes ao processo de recarga. Neste capítulo são apresentados os modelos da estação de recarga e os resultados da simulação da interação com a rede elétrica, em diferentes pontos de operação associados à recarga das baterias de VE.
- Por fim, o Capítulo 5 apresenta uma proposta de indicador de impactos elétricos para carregamento de veículos elétricos, com foco em análises preditivas visando a avaliar a viabilidade técnica previamente à implementação de estações de recarga conectadas à rede de distribuição.

2. MODELAGEM DE ESTAÇÕES DE RECARGA E VEÍCULOS ELÉTRICOS

A modelagem de estações de recarga e de veículos elétricos são essenciais para o desenvolvimento de ferramentas de simulação com capacidade de representar adequadamente estações de recarga de forma realística. Os carregadores desempenham um papel crucial na infraestrutura dos veículos elétricos, uma vez que são responsáveis por adequar a energia elétrica fornecida pela rede em uma saída de corrente contínua (CC) com níveis de tensão e corrente específicos (Habib *et al.*, 2020).

Considerando o contexto da mobilidade elétrica e as estratégias de conexão à rede elétrica, é essencial a representação da dinâmica de operação de carregadores e a interação com os veículos elétricos. Neste sentido, este capítulo descreve a modelagem dos principais componentes associados à recarga de veículos elétricos considerando os principais componentes e modelos em ambiente de simulação.

2.1 Estações de Recarga para Veículos Elétricos

Os carregadores de veículos elétricos são dispositivos baseados em conversores eletrônicos de potência chaveados, cuja principal função é garantir que a bateria do veículo seja carregada de forma eficiente e segura. O carregador deve converter a energia elétrica da rede, fornecida na forma de corrente alternada (CA), em uma tensão e corrente adequadas para a carga da bateria. Para o desenvolvimento desta função é necessário o controle preciso dos níveis de tensão e corrente de saída, de acordo com as especificações do veículo e da bateria.

O equipamento de recarga dos veículos segundo a norma SAE J1772 é dividido em três categorias: Nível 1 (carregamento lento), Nível 2 (carregamento semirrápido), Nível 3 (carregamento rápido), a categorização é realizado segundo a potência de saída do equipamento e corrente de saída máxima permitida (Khan *et al.*, 2018):

- Nível 1: O carregamento de nível 1 é o tipo mais lento de carregamento de EV, utiliza uma tomada doméstica padrão, normalmente com a capacidade de corrente de 15 ou 20 A. No nível de carregamento 1 o consome energético estar na faixa de 1,4 a 1,9 kW, dependendo da classificação de corrente, e leva de 8 a 16 horas para uma carga completa, sujeito ao tipo e tamanho da bateria. O nível 1 é o método de carregamento de EV utilizado para residências pois não necessita de nenhuma infraestrutura adicional (Khan *et al.*, 2018).

- **Nível 2:** O carregamento nível 2 é geralmente considerado o esquema de carregamento mais proeminente para instalações de uso público como shoppings e mercados. Este nível pode operar em duas opções sendo elas uma tomada de corrente alternada de 240 V monofásica com capacidade de corrente de 40 A ou uma conexão de corrente alternada trifásica de 400 V com capacidade de corrente de 80 A. O carregamento de Nível 2 fornece energia na faixa de 7,7 a 25,6 kW e leva de 4 a 8 horas para carregar completamente um VE (Khan *et al.*, 2018).
- **O Nível 3 ou carregamento rápido DC:** é o método de carregamento mais apropriado para instalações de uso rápido, pois é concebido para oferecer aos clientes uma experiência semelhante à de um posto de abastecimento comercial com combustível à base de óleo. O carregamento rápido oferece carregamento até um nível de 80% em cerca de 10-15 minutos, dependendo do tipo e tamanho da bateria do VE. o carregamento rápido apresenta um consumo na faixa de 40 a 100 kW. A distribuição de níveis de carregamento está descrito na Tabela 1 (Khan *et al.*, 2018).

Tabela 1 – Níveis de Carregamento por faixa de Potência. Fonte: (Khan *et al.*, 2018)

Nível	Faixa de potência(kW)	Alimentação
1	1,4 - 1,9	CA
2	7,7 – 25,6	CA
3	40-100	CC

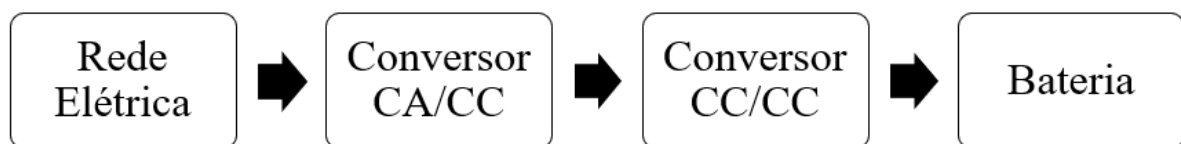
Devido aos esforços na introdução de VEs na rede o principal vetor a ser analisados são as opções de carregamento rápido, por apresentar o maior impacto a rede e apresenta maior intermitência. O estudo a seguir realiza o enfoque neste modelo de recarga.

Com a utilização de conversores chaveados de potência no processo de recarga, efeitos indesejáveis pode ocorrer, tal como as deformidades no sinal da forma de onda da tensão, resultado em distorção harmônica na corrente e um baixo fator de potência. A Distorção Harmônica refere-se à presença de componentes de frequência indesejáveis no espectro do sinal tensão ou na corrente elétrica, que podem resultar em interferência eletromagnética e afetar a qualidade da energia fornecida (Subjak; Mcquilkin, 1990).

Portanto, os projetistas de carregadores para bateria devem buscar a minimização dos efeitos negativos gerados pelo chaveamento, como a ocorrência de componentes harmônicas e o fator de potência, a fim de garantir um carregamento eficiente e de qualidade. Para viabilizar os avanços em tecnologias de recarga, o desenvolvimento de novas topologias e a modelagem detalhada dos componentes é essencial.

O carregamento de baterias pode ser realizado utilizando diferentes topologias de conversores. As principais opções dos carregadores comerciais disponíveis no mercado seguem conforme descrito no diagrama de blocos presente na Figura 1 (Habib *et al.*, 2020).

Figura 1 - Diagrama de blocos das principais componentes de estações de recarga



Fonte: (Habib *et al.*, 2020)

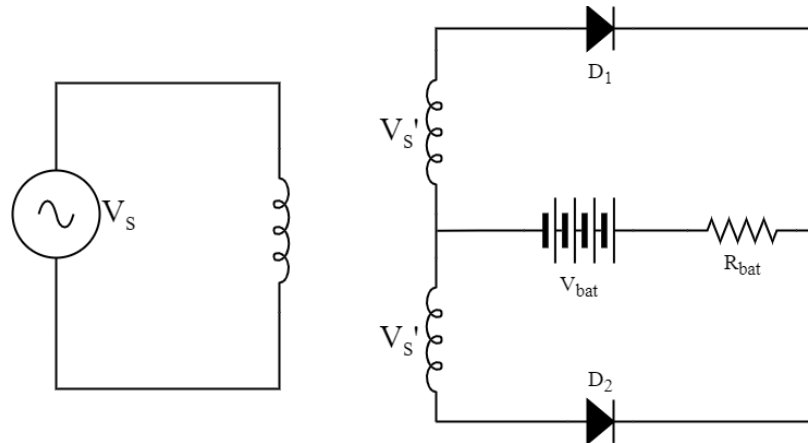
A estrutura do carregador de baterias para VE é composta por dois estágios principais (Habib *et al.*, 2020). O primeiro estágio, denominado conversor CA/CC ou pré-regulador, desempenha um papel crucial na transformação da tensão alternada da rede em uma tensão contínua adequada para carregar as baterias. O estágio é responsável por garantir um alto fator de potência, ou seja, otimizar a eficiência da conversão de energia e minimizar as perdas durante o processo de carregamento. No pré-regulador pode-se incorporar funções de filtragem e correção do fator de potência, visando melhorar a qualidade da energia fornecida e atender aos requisitos regulatórios (Habib *et al.*, 2020).

O segundo estágio é o conversor CC/CC, que geralmente opera com chaveamento em alta frequência, usualmente isolado do estágio anterior, e tem como principal função adaptar a tensão de saída do pré-regulador à tensão necessária para o carregamento do banco de baterias, aplicando diferentes mecanismos de controle para regular a tensão e a corrente de saída, garantindo que a bateria seja carregada adequadamente mantendo os níveis de potência, corrente e tensão dentro da faixa de operação segura. Outro ponto acerca do conversor CC/CC consiste na possibilidade de incorporar recursos de monitoramento e proteção, como detecção de temperatura, proteção contra sobrecarga e curto-circuito, a fim de garantir a integridade da bateria e prevenir danos físicos (Schaltz, 2011).

2.1.1 Estação de Recarga – Modelo simplificado

Um dos primeiros modelos de topologia para carregadores elétricos foi desenvolvida em 1973 (Lafuente, 2011) onde os estágios CA/CC e CC/CC ocorriam em uma única etapa - o modelo é apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Modelo básico de estação de recarga para bateria proposto em 1973.



Fonte: (Lafuente, 2011).

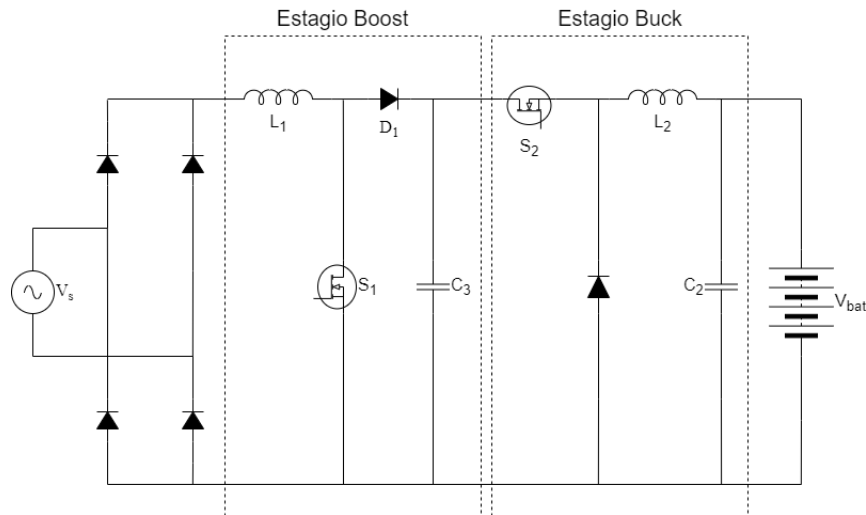
A Figura 2 ilustra uma topologia básica que consiste em um transformador de baixa frequência com tap central e um retificador de onda completa no secundário (Bradley, 1981). Na configuração, o retificador tem a função de converter a forma de onda alternada da corrente de entrada em corrente contínua para a bateria. O transformador de baixa frequência, por sua vez, isola eletricamente o circuito de saída do circuito de entrada. No entanto, é importante ressaltar que a topologia básica não é dotada de correção de fator de potência (PFC – *Power Factor Correction*), o que significa que a eficiência da conversão de energia pode ser afetada e pode haver uma maior demanda de corrente da rede elétrica. A topologia básica apresentada não permite um controle preciso das grandezas de saída, como a tensão e corrente aplicadas à bateria (Bradley, 1981).

2.1.2 Estação de recarga com conversores boost e buck

A falta de correção de fator de potência pode resultar em uma carga reativa indesejada para a rede elétrica, causando desperdício de energia e afetando a qualidade do fornecimento de energia. Da mesma forma, a ausência de controle das grandezas de saída aplicadas à bateria pode limitar a capacidade de gerenciar o processo de carregamento de forma eficiente e segura.

A segunda topologia, mostrada na Figura 3, é composta por um conversor monofásico de dois estágios. O primeiro estágio é um conversor *boost*, e o segundo estágio é um conversor buck (Klontz; Divan, [s. d.]).

Figura 3-Topologia de carregamento de estação de recargar por conversores boost e buck.



Fonte: (Lafuente, 2011).

No estágio do conversor *boost* (CBO) com PFC, a tensão de entrada da rede elétrica é retificada e filtrada para obter uma tensão contínua. Em seguida, a tensão contínua é elevada por meio CBO, que possui um indutor, um capacitor e um transistor de potência. O CBO, ao regular a tensão de saída para um valor superior ao da tensão de entrada, permite um controle preciso da tensão aplicada ao estágio seguinte (Klontz; Divan, [s. d.]), onde um circuito de controle monitora a forma de onda da corrente de entrada e ajusta o ciclo de trabalho do transistor de potência para garantir que a corrente esteja em fase com a tensão de entrada, melhorando o fator de potência, reduzindo a carga reativa na rede elétrica e aumentando a eficiência do sistema.

No segundo estágio da topologia do carregador, um segundo conversor (topologia buck) é utilizado para ajustar a tensão de saída do estágio anterior para a tensão desejada de carregamento da bateria. O conversor buck é composto por um indutor, um capacitor e um transistor de potência, permitindo reduzir a tensão contínua do estágio anterior para uma tensão inferior e controlada, adequada para o carregamento da bateria.

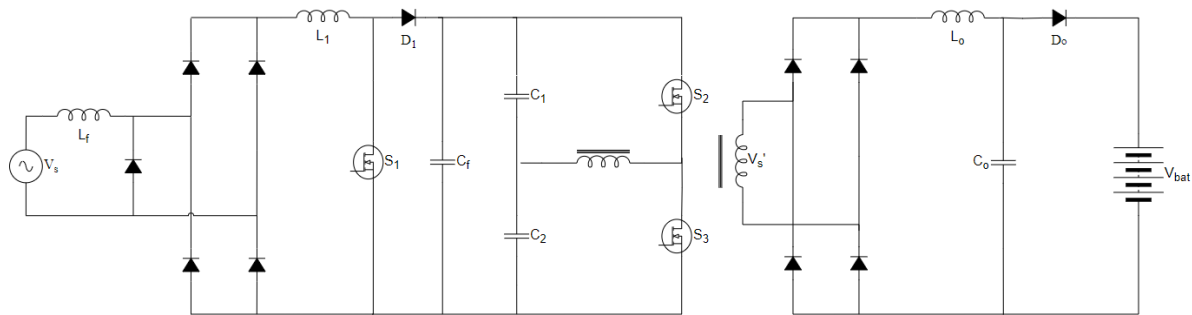
A topologia de dois estágios do conversor boost com PFC seguida pelo conversor buck, oferece benefícios como alta eficiência de conversão, melhor qualidade do fornecimento de energia e controle preciso das grandezas de saída. A correção de fator de potência contribui para reduzir as perdas de energia e o impacto na rede elétrica, enquanto o conversor buck

permite adaptar a tensão para atender aos requisitos de carga da bateria com segurança (Klontzl; Divan, [s. d.]).

2.1.3 Estação de recarga baseada em conversores *boost* e *half-bridge*

Outra topologia para estação de recarga para baterias foi descrita em (Masserant; Stuart, 1997) e também é composta por dois estágios. O primeiro igual ao conversor anterior consiste em um estágio *boost* convencional com PFC, apresentando os mesmos benefícios mencionados anteriormente. O segundo estágio, no entanto, é formado por um conversor Half-bridge isolado - conforme apresentado na Figura 4 .

Figura 4 -Topologia de carregamento de estação de recargar por conversores boost e half-bridge.



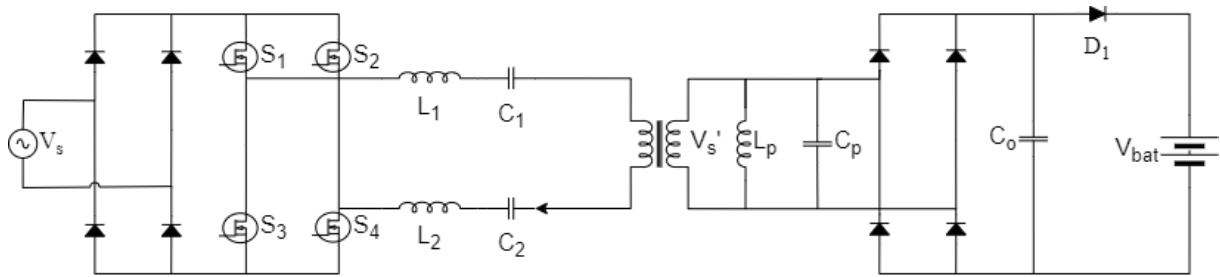
Fonte: (Lafuente, 2011).

No segundo estágio, há um conversor CC/CC *half-bridge* isolado em alta frequência com retificador em ponte completa. Na etapa, a tensão contínua proveniente do estágio anterior é convertida para a tensão adequada para a carga da bateria. O conversor half-bridge é composto por dois transistores de potência controlados de forma complementar, um indutor e um capacitor (Masserant; Stuart, 1997). A alta frequência e o isolamento são características importantes do estágio, pois permitem maior eficiência de conversão e a possibilidade de isolar eletricamente a bateria do sistema de alimentação.

2.1.4 Estação de recarga baseada em conversor Ressonante

Outra opção de topologia é a opção de conversores ressonantes, como pode ser observado na Figura 5 . A configuração utilizada é baseada em um conversor CC/CC ressonante. A topologia possui uma ponte retificadora na entrada, responsável por retificar a corrente alternada da rede elétrica, e um conversor ressonante isolado em alta frequência com retificação em ponte completa na saída (Egan *et al.*, 2007).

Figura 5 -Topologia de carregamento de estação de recargar por conversor ressonante.



Fonte: (Lafuente, 2011).

O conversor CC/CC ressonante utiliza a ressonância do circuito para realizar a conversão de tensão de forma eficiente. O conversor é chaveado em alta frequência, o que permite uma redução das perdas de comutação e maior eficiência geral do sistema. a topologia ressonante contribui também para minimizar as interferências eletromagnéticas (IME) e o estresse nos componentes, resultando em um carregador considerado robusto/confiável.

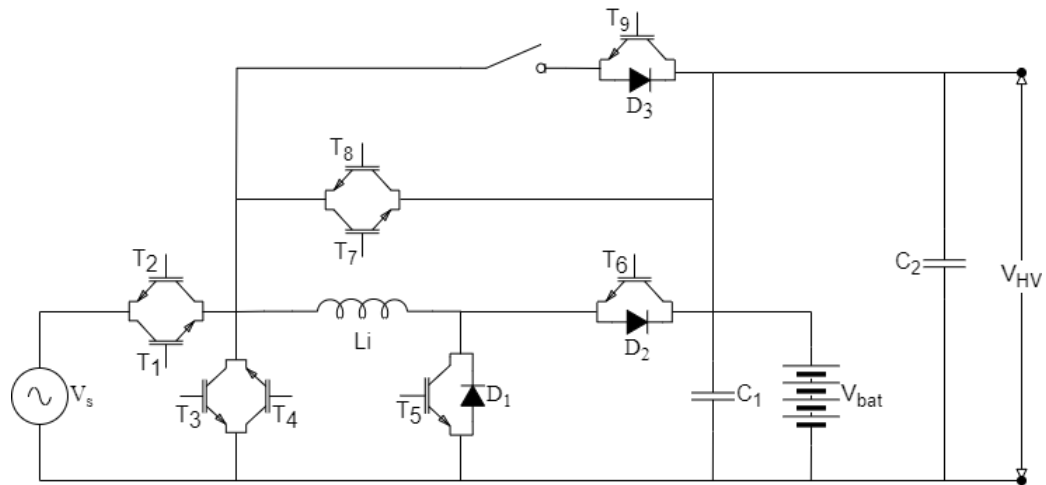
No estágio de entrada, a ponte retificadora processa a corrente alternada da rede elétrica, convertendo-a em corrente contínua. A corrente contínua é então fornecida ao estágio de conversão ressonante. No estágio de saída, o conversor ressonante isolado em alta frequência, juntamente com a retificação em ponte completa, ajusta a tensão de saída para a carga da bateria.

A utilização da ressonância no conversor permite uma melhor distribuição de energia ao longo do ciclo de comutação, reduzindo as perdas de comutação e minimizando os picos de corrente e tensão. Outra característica da topologia ressonante consiste em oferece maior flexibilidade na adaptação de tensão de saída para diferentes tipos de baterias e requisitos de carga (Egan *et al.*, 2007).

2.1.5 Estação de Recarga acoplada ao carregador interno do VE

Outra opção é integrar o carregador com os conversores internos do veículo. Uma das formas de fazer é utilizando o conversor CC/CC que é utilizado para regular a tensão da bateria dentro do veículo, como ilustrado na Figura 6. No modelo o conversor é responsável por fornecer energia para a propulsão do veículo utilizando as chaves T6-T3-D3. Durante a frenagem regenerativa, as chaves T9-D2-T6 são utilizadas. Durante o processo de carregamento da bateria, o conversor CC/CC pode ser utilizado para direcionar a energia proveniente da fonte de carregamento para a bateria (Khaligh; Dusmez, 2012).

Figura 6 - Topologia de carregamento de estação de recarga por conversor CC/CC integrado aos conversores internos do veículo



Fonte: (Khaligh; Dusmez, 2012).

A integração permite que o carregador utilize os mesmos componentes de potência do conversor CC/CC interno, reduzindo custos e simplificando o sistema. A abordagem apresentada permite que o veículo seja carregado tanto por meio de uma fonte externa quanto durante a frenagem regenerativa, aproveitando a energia gerada durante a desaceleração do veículo (Khaligh; Dusmez, 2012).

Com a desaceleração, o carregador é capaz de regular a corrente e a tensão de carga da bateria de acordo com os requisitos do veículo, garantindo um carregamento eficiente e seguro. A integração dos conversores internos com o carregador contribui para a otimização do sistema de energia do veículo elétrico.

Existem diversas topologias e modelos que podem ser utilizados para operar a recarga das baterias durante o carregamento de veículos elétricos. Uma das opções amplamente aceitas é a operação de um único inversor em conjunto com um filtro ativo. A topologia é comumente utilizada em softwares de simulação, como o Matlab Simulink (Butler; Ehsani; Kamath, 1999) e o Typhoon Hill (Typhoon HIL, 2023). Ao utilizar softwares de simulação, como o Matlab Simulink e o Typhoon Hill, é possível modelar e simular o comportamento do inversor, do filtro ativo e de outros componentes do sistema de carregamento do veículo elétrico. As simulações oferecem recursos avançados para realizar análises e otimizações, permitindo uma melhor compreensão do desempenho do sistema de carregamento.

Este tópico descreveu a modelagem e configurações de estações de recarga. O tópico a seguir descreve a representação dos veículos elétricos e seus subcomponentes.

2.2 Modelagem de Veículos Elétricos

Veículos elétricos podem ser modelados com uma ampla variedade de abordagens, considerando aspectos de dinâmica rápida ou em avaliações eletroenergéticas considerando aspectos de energia em médio e longo prazo.

No trabalho de (Mesbahi *et al.*, 2016) é proposto um modelo de bateria de íon-lítio para veículos elétricos. O modelo considera diferentes condições de carga e descarga da bateria, além de utilizar ciclos de condução para avaliar o desempenho do modelo.

O estudo apresentado em (Wager; Whale; Braunl, 2016) envolveu testes em estrada com automóveis para determinar o consumo real de energia e coletar dados para calcular a autonomia. No estudo, os diferentes componentes de demanda de energia das baterias foram modelados matematicamente, permitindo estimar o consumo de energia e a autonomia em diferentes velocidades.

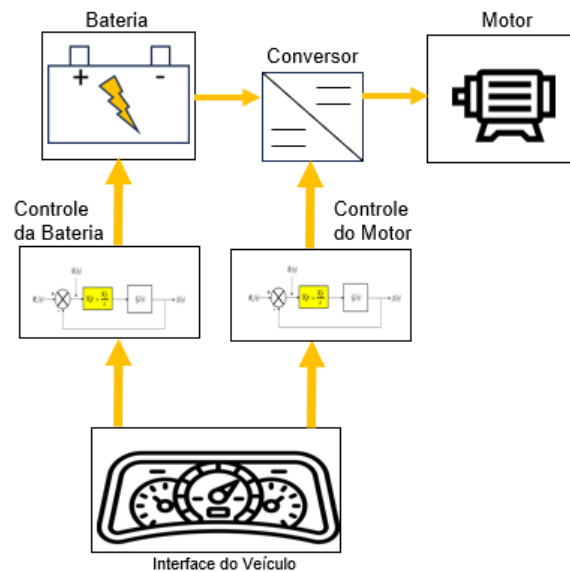
As abordagens matemáticas são amplamente aceitas na literatura e permitem uma análise detalhada do desempenho das baterias em veículos elétricos. Ao modelar e simular o comportamento das baterias sob diferentes condições de operação, é possível obter informações importantes sobre a eficiência, vida útil e autonomia dos veículos elétricos.

Além dos estudos apresentados, há diversas outras abordagens matemáticas utilizadas na modelagem de veículos elétricos, como a análise de conectividade à rede de distribuição elétrica e as análises energéticas e ambientais. As abordagens apresentadas contribuem para o desenvolvimento e aprimoramento dos veículos elétricos, permitindo uma melhor compreensão do desempenho e impacto ambiental.

A abordagem matemática utilizada na simulação desenvolvida será apresentada e descrita durante as próximas etapas.

2.2.1 Componentes dos Veículos Elétricos

Considerando os modelos descritos na literatura, veículos elétricos são compostos de diversos componentes e subsistemas. Em essência, um VE é composto por motores elétricos, os conversores eletrônicos de potência de acoplamento, o arranjo de baterias, o controlador de motor, o controlador de bateria e a interface do veículo conforme ilustrado na Figura 7.A combinação de elementos são integrados para a operação adequada do veículo elétrico, permitindo a sua eficiência e desempenho (Mohd; Hassan; Aziz, 2015).

Figura 7 - Modelagem de Veículos elétricos

Fonte: Adaptado de (Mohd; Hassan; Aziz, 2015)

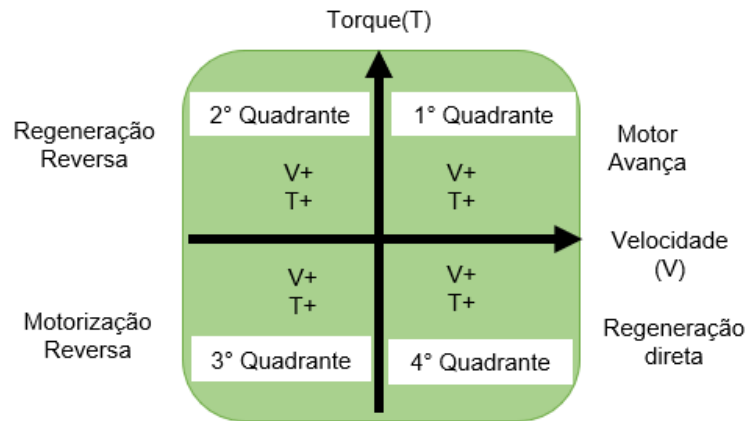
O motor elétrico é responsável por converter a energia elétrica em energia mecânica, impulsionando o veículo. A eletrônica de potência desempenha um papel crucial ao controlar a tensão, corrente e frequência fornecidas ao motor normalmente representada em análise como com conversor CC/CC, de acordo com as demandas de operação. A bateria, que normalmente é composta por células de Íons de Lítio, armazena a energia elétrica necessária para suprir o motor elétrico, fornecendo as tensões e correntes demandadas nos diversos modos de operação.

Os controladores do motor e da bateria atuam como "cérebros" do sistema, monitorando e controlando o fluxo de energia entre a bateria e o motor. O controlador de motor regula a potência fornecida ao motor, enquanto o controlador de bateria gerencia o fluxo de energia da bateria para o motor.

A interface do veículo é a conexão entre os sensores e os controles que se comunicam com os controladores, permitindo que o veículo receba informações sobre velocidade, torque, temperatura e outras variáveis essenciais para o controle adequado do motor e da bateria.

Ao considerar as diferentes direções de operação (sentido horário e anti-horário) e os modos de operação (aceleração e desaceleração), o motor elétrico pode ser dividido em quatro quadrantes distintos, conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8 - Funcionamento em 4 quadrantes do acionamento do VE



Fonte: (Mohd; Hassan; Aziz, 2015).

Os quadrantes representam as diferentes combinações de velocidade e torque aplicados ao motor. Por exemplo, no modo motriz, quando a velocidade e o torque têm a mesma polaridade, o motor impulsiona o veículo para a frente. Já no modo regenerativo, quando a polaridade difere, o motor atua como um gerador, recuperando energia cinética e convertendo-a em energia elétrica para recarregar a bateria durante a desaceleração ou frenagem.

Para o modelo de um VE, foram determinadas equações matemáticas para representar cada componente do VE. O motor, a bateria, o controlador de motor e o controlador proporcional-integral (P-I) foram modelados como blocos, formando assim um sistema de acionamento para o EV. As equações utilizadas são as seguintes:

Para um motor de corrente contínua (CC), o torque desenvolvido no motor (T_d) é proporcional à corrente do induzido (I_a), conforme a Equação (1):

$$T_d = K_m \cdot I_a, \quad (1)$$

onde K_m é a constante do motor, que depende da construção do enrolamento. A tensão desenvolvida no motor (V_d) é proporcional à velocidade do induzido (ω_d):

$$V_d = K_m \cdot \omega_d \quad (2)$$

A tensão no lado alto do motor (V_H) é calculada pela seguinte equação:

$$V_H = I_H \cdot R_a + L_H \cdot di(t)/dt + V_d \quad (3)$$

Na equação, I_H representa a corrente no lado alto (corrente nos terminais), R_a é o valor da resistência do induzido e L_H é o valor do indutor no lado alto.

Assumindo que não há perdas por atrito nem perdas de inércia, o torque elétrico desenvolvido (T_d) é igual ao torque mecânico de saída (T_{mech}). Portanto, a potência elétrica desenvolvida é igual à potência mecânica desenvolvida. Um controlador de motor simples é utilizado para manter a potência de entrada igual à potência de saída. Para o caso, assume-se que o controlador é ideal, sem perdas e sem atraso de tempo.

A tensão no lado alto (V_H) em função da tensão no lado baixo (V_L) é descrita na Equação (5) e a corrente no lado alto (I_H) em função da corrente no lado baixo (I_L) está na Equação (6). A constante K representa o valor do ganho do controlador, V_L é a tensão no lado baixo (saída) e I_L é a corrente no lado baixo (saída).

$$V_H = K \cdot V_L \quad (4)$$

$$I_H = (1/K) \cdot I_L \quad (5)$$

A bateria é modelada como uma fonte de tensão (E_B) e possui perda de potência interna devido à resistência da bateria (R_A). A equação para a tensão no lado baixo (V_L) é dada por:

$$V_L = I_L \cdot R_A + E_B \quad (6)$$

A tensão interna requerida da bateria é calculada usando a corrente e a tensão do controlador de motor. A diferença entre a tensão calculada da bateria (E_B (calculada)) e a tensão real da bateria (E_B (real)) representa o erro de tensão da bateria, B_{Err} , que é utilizado pelo controlador P-I para ajustar o ganho.

$$B_{Err} = E_B \text{ (real)} - E_B \text{ (calculada)} \quad (7)$$

O controlador P-I utiliza os valores do ganho proporcional (K_P) e do ganho integral (K_I) para calcular o valor do controlador K do controlador de motor. A equação é dada por:

$$K = (K_P + s \cdot K_I) \cdot B_{Err} \quad (8)$$

O ciclo de condução, a estrada é modelada na simulação por computador para auxiliar na redução dos custos dos testes em estrada. Para fins de teste e simulação de condução, os valores de velocidade do veículo são estabelecidos normalmente para um ciclo de condução de 100 segundos. Normalmente, o valor de torque é obtido a partir do valor de velocidade e da dinâmica do veículo. No entanto, como a dinâmica do veículo não está incluída no modelo,

assume-se que os valores de torque são conhecidos para a simulação. Os dados de velocidade e torque são adicionados ao subsistema do ciclo de condução usando tabelas de busca (Mohd; Hassan; Aziz, 2015).

Outra opção matemática para modelagem do veículo elétrico (Typhoon HIL, 2023) subdivide este equipamento em lógica de conexão, elementos de controle, dispositivo de medição, e blocos de modelo mecânico do motor

A lógica de conexão tem como objetivo controlar a conexão e desconexão do veículo elétrico (VE) à estação de carregamento. Sendo feito para evitar a conexão durante o funcionamento do veículo e para prevenir o acionamento do motor durante o processo de recarga.

Os sinais de referência são elementos de controle utilizados para gerenciar o VE por meio do controle por largura de pulso (PWM) de um inversor. Um Medidor Trifásico é empregado para medir as correntes e o fluxo de potência ativa entre o motor de indução e o inversor.

Um fator crucial no controle da modelagem do VE é a referência de fluxo gerada. Conforme a velocidade do motor aumenta, a tensão do enrolamento da armadura é aumentada para manter o fluxo. Quando o limite de tensão do inversor é atingido, a velocidade do rotor não pode mais aumentar, o que define a velocidade de referência base. Em seguida, utiliza-se o método de enfraquecimento do fluxo para permitir que o rotor ultrapasse a velocidade base. durante o enfraquecimento, a referência de fluxo máximo é multiplicada pelo inverso da velocidade medida do rotor. A equação que define a gestão de fluxo é apresentada na Equação (9):

$$\psi_{ref} = \psi_{max} \frac{\omega_{base}}{\omega_r} \quad (9)$$

Quanto à parte mecânica, que é representada por um motor de indução com torque variável, as referências matemáticas são regidas pela lei de Newton para rotações:

$$\frac{dV_{veh}}{dt} = \frac{1}{m_{veh}} (F_{meh} - F_{break} - F_{load}), \quad (10)$$

onde V_{veh} é a velocidade do veículo, m_{veh} é a massa do veículo, F_{meh} é a força de tração mecânica efetiva do veículo, F_{break} é a força de frenagem, e F_{load} é a soma das forças de carga aplicadas ao veículo. A força de tração mecânica efetiva é representada pela Equação (12).

$$F_{meh} = \eta_{trans} T_{el} \frac{2i_g}{d_{whell}} \quad (11)$$

Onde η_{trans} é a eficiência da transmissão, T_{el} é o torque elétrico produzido pelo motor, i_g a relação de transmissão e d_{wheel} o diâmetro das rodas.

A força de frenagem é calculada pela Eq.13:

$$F_{break} = \frac{k_{break}}{100} F_{max}, \quad (12)$$

onde k_{break} é a porcentagem (0-100) da força máxima de frenagem F_{max} que pode ser aplicado.

$$F_{load} = F_{grade} + F_{rolling} + F_{wind} \quad (13)$$

onde F_{grade} é um componente da força gravitacional projetada para a superfície, $F_{rolling}$ a força de resistência ao rolamento e F_{wind} é a força de resistência do vento.

$$F_{grade} = W \sin \alpha \quad (14)$$

Onde W é o peso do veículo e α é o ângulo de inclinação.

A Equação ((15)) descreve o cálculo da força do rolamento $F_{rolling}$

$$F_{rolling} = V \left[\frac{km}{h} \right] f_r \quad (15)$$

Onde $V \left[\frac{km}{h} \right]$ é a velocidade do veículo em $V \left[\frac{km}{h} \right]$ e f_r é a resistência ao rolamento.

A última etapa no cálculo de F_{load} é apresentado na Equação ((16)) onde é calculado o F_{wind}

$$F_{wind} = A_d \frac{\rho V^2}{2} \quad (16)$$

Onde A_d é a área de arrasto e ρ é a densidade do ar. A Equação ((17)) mostra como é calculado A_d

$$A_d = c_D A \quad (17)$$

Onde c_D é o coeficiente de arrasto e A é a área frontal do veículo.

2.3 Conclusões do Capítulo

Este capítulo apresentou a descrição dos modelos utilizados na cadeia da mobilidade elétrica. A modelagem das estações de recarga apresenta topologias para o desenvolvimento de tecnologias cada vez mais eficiente e com menor custo para produção, enquanto a modelagem do veículo elétrico visa otimizar a eficiência e o desempenho dos veículos, a fim de promover a sua aceitação e viabilidade no mercado.

Como descrito, as estações de recarga são baseadas em conversores eletrônicos chaveados, que podem interagir com a rede no ponto de conexão. O próximo capítulo apresenta um levantamento prospectivo dos principais impactos elétricos em potencial da conexão de estações de recarga e VEs na rede de distribuição.

3. IMPACTOS ELÉTRICOS DA CONEXÃO DE ESTAÇÕES DE RECARGA

Neste capítulo será apresentada uma análise referente aos principais impactos na rede elétrica no ponto de conexão de um eletroposto encontrados em literatura técnica - com o objetivo de avaliar os possíveis problemas que podem ocorrer após implementação do Eletroposto, bem como antecipar estratégias de solucionar os potenciais impactos conforme mencionado em (Costa *et al.*, 2021; Di Paolo, 2018; Wang *et al.*, 2021) um dos ponto crítico na instalação é o terminal do circuito no Ponto de Acoplamento Comum (PAC) - definido como sendo o ponto de conexão entre a rede e o empreendimento a ser analisado. O PAC é o ponto da rede elétrica suscetível a impactos de todos os subsistemas, principalmente as estações de recargas dos VEs como também o ponto a ser avaliado nos critérios de qualidade da energia.

Os indicadores de qualidade que quantificam os impactos elétricos no PAC podem sofrer influência não apenas dos elementos eletroposto, mas também do comportamento de outras cargas conectadas a rede eletricamente próximas ao ponto (tal como em função do acionamento eletrônico de motores a nível industrial). Desta forma, visando eliminar influências externas, define-se um padrão para a realização de testes, seguindo a sistematização definida pelo IEEE, como descrito em (Wang *et al.*, 2021) e da norma PRODIST 8 para o caso brasileiro a qual devem ser atendida no que se refere os parâmetros de qualidade avaliados no brasil para o caso do PRODIST como no mundo para o IEEE a seguir será apresentado um resumo dos parâmetros de qualidade da energia verificado referentes aos impactos elétricos gerado pelas estações de recarga

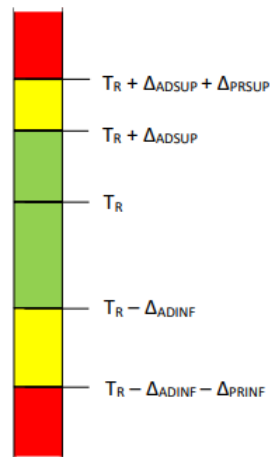
Existem diversos parâmetros para caracterizar os fenômenos de Qualidade da energia elétrica (QEE) de uma determinada rede. Considerando o modelo regulatório vigente, os principais parâmetros conforme descrito no Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição da ANEEL (ANEEL, 2021): Variação de tensão em regime permanente, Fator de Potência, Harmônicos, Desequilíbrio de Tensão, Flutuação de tensão, Variação de frequência e Variação de Tensão de curta duração. Nos tópicos a seguir será apresentado cada indicador para caracterizar o referido aspecto de QEE e os limites referentes a cada fenômeno.

3.1 Variação de tensão em regime permanente

A variação de tensão em regime se refere a comparação do valor de tensão obtido por intermédio de medição em relação aos níveis de tensão especificados como padrão. Os níveis

de tensão especificados são subdividido em 3 níveis são eles adequados precários e críticos, conforme ilustrado na Figura 9.

Figura 9 - Faixas de tensão.



Fonte:(ANEEL, 2021).

Sendo TR a Tensão de Referência. A faixa Adequada de Tensão é o intervalo entre $(T_R - \Delta_{ADINF})$ e $(T_R + \Delta_{ADSUP})$. As faixas Precárias de Tensão estão no intervalo entre $(T_R + \Delta_{ADSUP})$ e $(T_R + \Delta_{ADSUP} + \Delta_{PRSUP})$ ou intervalo entre $(T_R - \Delta_{ADINF} - \Delta_{PRINF})$ e $(T_R - \Delta_{ADINF})$. Enquanto as Faixas Críticas de Tensão são os valores acima de $(T_R + \Delta_{ADSUP} + \Delta_{PRSUP})$ ou abaixo de $(T_R - \Delta_{ADINF} - \Delta_{PRINF})$.

Por exemplo, considerando uma tensão de referência de linha de 380 V (tensão de conexão do estudo caso a ser descrito posteriormente neste trabalho), a Tabela 2 apresenta a divisão entre os níveis de conformidade de tensão (ANEEL, 2021).

Tabela 2 - Faixas tensão para 380 V (entre fases).

Tensão de Atendimento	Faixa de Variação da tensão de leitura(v)
Adequada	$350 \leq TL \leq 399$
Precária	$331 \leq TL \leq 350$ ou $399 \leq TL \leq 403$
Crítica	$TL < 331$ ou $TL > 403$

Fonte:(ANEEL, 2021).

O fenômeno da variação de tensão é regulado por meio de indicadores de duração da transgressão, denominados DRP (duração relativa da transgressão de tensão precária) e DRC (duração relativa da transgressão de tensão Crítica) conforme as Equações (19) e (20) (ANEEL, 2021).

$$DRP = \frac{nlp}{1008} \times 100[\%] \quad (18)$$

$$DRC = \frac{nlc}{1008} \times 100[\%] \quad (19)$$

Onde nlp é o maior valor da tensão entre as fases do número de leituras situadas na faixa precária e nlc é maior valor da tensão entre as fases do número de leituras situadas na faixa crítica. Os limites dos indicadores são de 3% para as durações das transgressões (DRP_{limite} : 3% e DRC_{limite} : 3%).

3.2 Fator de potência

O fator de potência (FP) também caracteriza um indicador da qualidade da energia do ponto medido, definindo a proporção de energia ativa e reativa no ponto analisado. Por norma, a carga deve apresentar um valor de FP na faixa compreendida entre 0.92 a 1 indutivo ou 1 a 0.92 capacitivo. A Equação (21) apresenta a expressão matemática para calcular este indicador.

$$fp = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (20)$$

Onde P é a Potência Ativa e Q é a Potência Reativa.

3.3 Harmônicos

A ocorrência de componentes harmônicas no espectro dos sinal das formas de onda da tensão e da corrente tende a ser um dos principais parâmetros avaliados com relação a qualidade da energia, conforme descrito em (Subjak; Mcquilkkin, 1990).

Os harmônicos podem ser definidos como: uma componente senoidal de uma onda ou quantidade periódica com uma frequência que é um múltiplo integral da frequência fundamental. As distorções harmônicas são fenômenos elétricos associados aos harmônicos presentes na rede gerando deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação a onda senoidal de frequência fundamental (Subjak; Mcquilkkin, 1990).

O principal fator de causa de harmônicos são os dispositivos/cargas não lineares presentes no sistema, como por exemplo equipamentos eletrônicos com operação de

chaveamento – que intrinsecamente não apresenta um comportamento linear (Subjak; Mcquilkín, 1990).

Os principais indicadores do comportamento da distorção harmônica do sistema são apresentados na Tabela 3. As equações (22) a (26) define cada um dos parâmetros. O limite de ocorrência dos indicadores está descrito na Tabela 4.

Tabela 3 - Indicadores de Distorção Harmônica.

Descrição	Símbolo
Distorção harmônica individual de tensão de ordem h	$DIT_h\%$
Distorção harmônica total de tensão	$DTT\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3	$DTT_p\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3	$DTT_i\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3	$DTT_3\%$

Fonte:(ANEEL, 2021).

$$DIT_h\% = \frac{V_h}{V_1} \times 100[\%] \quad (21)$$

Sendo V_h a tensão harmônica de ordem h ; h a ordem harmônica individual e V_1 a tensão fundamental medida.

$$DTT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} V_h^2}}{V_1} \times 100[\%] \quad (22)$$

Sendo h as ordens harmônicas de 2 até h_{max} ; h_{max} a ordem harmônica máxima, conforme classe do equipamento de medição utilizado (classe A ou S); V_h = tensão harmônica de ordem h e V_1 = tensão fundamental medida.

$$DTT_p\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_p} V_h^2}}{V_1} \times 100[\%] \quad (23)$$

sendo h todas as ordens harmônicas pares, não múltiplas de 3 ($h = 2, 4, 8, 10, 14, 16, 20, 22, 26, 28, 32, 34, 38, \dots$); h_p a máxima ordem harmônica par, não múltipla de 3; V_h a tensão harmônica de ordem h e V_1 a tensão fundamental medida.

$$DTT_i\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=5}^{h_i} V_h^2}}{V_1} \times 100[\%] \quad (24)$$

sendo: h = todas as ordens harmônicas ímpares, não múltiplas de 3 ($h = 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31, 35, 37 \dots$); h_i = máxima ordem harmônica ímpar, não múltipla de 3; V_h = tensão harmônica de ordem h ; V_1 = tensão fundamental medida.

$$DTT_3\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=3}^{h_3} V_h^2}}{V_1} \times 100[\%] \quad (25)$$

sendo: h as ordens harmônicas múltiplas de 3 ($h = 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33, 36, 39 \dots$); h_3 a máxima ordem harmônica múltipla de 3 e V_h = tensão harmônica de ordem h e V_1 = tensão fundamental medida.

Tabela 4 - Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental).

Indicador	Tensão nominal (V_n)
	$V_n < 2,3 \text{ kV}$
$DTT_{95\%}$	10,0%
$DTT_p_{95\%}$	2,5%
$DTT_i_{95\%}$	7,5%
$DTT_3_{95\%}$	6,5%

Fonte: (ANEEL, 2021)

3.4 Desequilíbrio de tensão

Fenômeno que ocorre no sistema elétrico definido por qualquer diferença de amplitude ou ângulo entre as fases do sistema trifásica. As principais causas deste fenômeno ocorrem pelo modo de conexão de carga e assimetrias monofásicas naturais da rede elétrica. O indicativo deste fenômeno é denominado Fator de desequilíbrio (FD%) e é calculado conforme a Equação (27).

$$FD\% = \frac{V_-}{V_+} \times 100 [\%] \quad (26)$$

sendo $FD\%$ o fator de desequilíbrio de tensão, V_- a magnitude da tensão eficaz de sequência negativa na frequência fundamental e V_+ a magnitude da tensão eficaz de sequência positiva na frequência fundamental. O limite para o fator de desequilíbrio de tensão para redes com tensão nominal inferior a 2,3 kV é de 3%.

3.5 Variação de frequência

Para a manutenção da estabilidade da rede de distribuição (em condições normais de operação) a frequência deve se manter nos limites de 59,9 a 60,1 (determinados pelo Modulo 8 do PRODIST). Os principais fatores que levam a ocorrência de distúrbio na magnitude da frequência estão relacionados com a variação abrupta de cargas no tempo, pela ação dos controles de velocidade associados aos pontos de geração conectados ao sistema.

Variações de frequência acima dos limites pré-estabelecidos podem implicar em ocorrência de saída de operação equipamentos, principalmente na conexão de fontes de geração distribuída.

Mediante a ocorrência de distúrbios no sistema as instalações geradoras devem operar para garantir que a frequência retorne no intervalo de 30 segundos após a ocorrência para a faixa de valor de 59,5 Hz a 60,5 Hz, para permitir a recuperação do equilíbrio carga-geração (ANEEL, 2021).

Caso ocorra a necessidade de corte de geração ou de carga, para permitir o equilíbrio carga-geração a frequência na rede pode permanecer acima de 62 Hz por no máximo 30 segundos e acima de 63,5 por no máximo 10 segundos, os limites para condição de queda de frequência são pode permanecer abaixo de 58,5 Hz por no máximo 10 segundos e abaixo de 57,5 Hz por no máximo 5 segundos. não podendo exceder 66 Hz ou ser inferior a 56,5Hz em nenhum tempo de operação (ANEEL, 2021).

3.6 Flutuação de tensão

A flutuação de tensão é um fenômeno na rede elétrica definido como sendo a variação aleatória, repetitiva ou esporádica do valor eficaz ou de pico da tensão instantânea.

As flutuações de tensão têm como principal fator gerador as oscilações geradas pela variação de cargas. Na rede de baixas tensão, as oscilações podem ser provocadas, por exemplo, por eletrodomésticos, bombas d'água e elevadores. No caso da rede de média tensão, as cargas que podem levar a ocorrência podem ser fornos a arco elétrico, máquinas de solda, laminadores e grandes motores. Para sistemas de alta tensão este fenômeno normalmente está associado a cargas de maior potência, como durante o processo de energização de uma indústria ou de Linhas de Transmissão.

O principal efeito da flutuação de tensão consiste no aparecimento de *flickers* - que são cintilações de iluminação que provocam uma sensação desagradáveis para a visão humana. Os

indicadores de flutuação de tensão são o P_{st} (Severidade de Flutuação de Tensão de Curta Duração), o P_{it} (Severidade de Flutuação de Tensão de Longa Duração) e o $P_{st95\%}$ (Valor do indicador P_{st} que foi superado em apenas 5 % das leituras válidas). O indicador P_{st} representa a severidade dos níveis de cintilações luminosas flickers associados a flutuação de tensão verificada num período contínuo de 2 horas, calculado segundo a Equação (28). O indicador $P_{st95\%}$ que representa o valor do indicador P_{st} que foi superado em apenas 5% das leituras validas (ANEEL, 2021).

$$P_{st} = \sqrt{0,0314P_{0,1} + 0,0525P_1 + 0,065P_3 + 0,28P_{10} + 0,08P_{50}} \quad (27)$$

Onde P_i ($i=0,1;1;3;10;50$) corresponde ao nível de flutuação de tensão que foi ultrapassado durante $i\%$ do tempo obtido a partir da função de distribuição acumulada complementar, de acordo com o procedimento estabelecido nas Normas IEC (International Electrotechnical Commission). O P_{it} corresponde ao valor que representa 12 amostras consecutivas de P_{st} , como estabelecido na Equação (29). O limite estabelecido para este fenômeno é definido segundo a Tabela 5.

$$P_{it} = \sqrt[3]{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} (P_{st_i})^3} \quad (28)$$

Tabela 5 - Limite para o indicador Flutuação de Tensão.

Indicador	Tensão nominal (V_n)
	$V_n < 1,0 \text{ kV}$
$P_{st95\%}$	1,0 p.u

Fonte:(ANEEL, 2021).

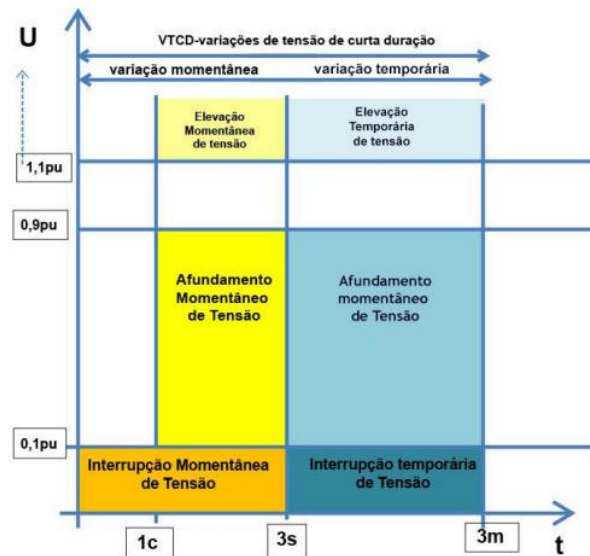
3.7 Variação de Tensão de Curta Duração - VTCD

As Variação de Tensão de Curta Duração (VTCD) são desvios significativos na amplitude do valor eficaz de tensão durante um intervalo de tempo inferior a 3 minutos. Este fenômeno é classificado segundo a Tabela 6. A Figura 10, uma ilustração da classificação dos eventos de VTCD, definidos conforme amplitude e duração.

Tabela 6 - Classificação das variações de tensão de curta duração.

Classificação	Denominação	Duração da Variação	Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência.
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão - IMT	Inferior ou igual a 3 segundos.	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Momentânea de Tensão - AMT	Superior ou igual a 1 ciclo e inferior ou igual a 3 segundos.	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Momentânea de Tensão - EMT	Superior ou igual a 1 ciclo e inferior ou igual a 3 segundos	Superior a 1,1 p.u
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão - IMT	Superior a 3 segundos e inferior a 3 minutos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Temporária de Tensão - AMT	Superior a 3 segundos e inferior a 3 minutos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Temporária de Tensão - EMT	Superior a 3 segundos e inferior a 3 minutos	Superior a 1,1 p.u

Fonte:(ANEEL, 2021).

Figura 10 - Classificação das VTCDs.

Fonte: (ANEEL, 2021).

Para avaliar os indicadores de VTCD, os eventos que devem ser monitorados são: a amplitude do evento (V_e), duração (Δt_e), frequência de ocorrência de eventos (f_e), fator de impacto (FI) e fator de impacto base (FI_{BASE}). Os indicadores são calculados conforme as Equações (30) a (32).

$$V_e = \frac{V_{res}}{V_{ref}} \times 100[\%] \quad (29)$$

$$\Delta t_e = t_f - t_i \quad (30)$$

$$f_e = n \quad (31)$$

Sendo V_e a amplitude do evento de VTCD (em %); V_{res} a tensão residual do evento de VTCD (em Volts) e V_{ref} a tensão de referência (em Volts); Δt_e a duração do evento de VTCD (em milissegundos); t_f o instante final do evento de VTCD e t_i = instante inicial do evento de VTCD; f_e a frequência de ocorrência de eventos de VTCD e n a quantidade de eventos de VTCD registrados no período de avaliação.

O Registro dos eventos de VTCD devem ser organizados em termos de amplitude e tempo. Em seguida são classificadas segundo as regiões de sensibilidade de diferentes cargas segundo a Tabela 7.

Tabela 7 -Estratificação das VTCD com base nos níveis de sensibilidade de diversas cargas.

Amplitude (pu)	Duração						
	[16,67ms- 100ms]	(100ms- 300ms]	(300ms- 600ms]	(600ms- 1seg]	(1seg- 3seg]	(3seg- 1min]	(1min- 3min]
>1.15	Região H			Região I			
(1,10-1,15)							
(0,85-0,90)	Região A						
(0,80-0,85)	Região A			Região G			
(0,70-0,80)	Região B	Região D					
(0,60-0,70)							
(0,50-0,60)	Região C						
(0,40-0,50)							
(0,30-0,40)	Região E			Região F			
(0,20-0,30)							
(0,10-0,20)							
<0,10							

Fonte:(ANEEL, 2021).

Após determina o número de ocorrências em cada região de sensibilidade e calculado o indicador fator de impacto-FI, que caracteriza a severidade da incidência de eventos de VTCD. A equação que define indicador FI é apresentada na Equação (33).

$$FI = \frac{\sum_{i=A}^I (f_{ei} x f_{pond_i})}{FI_{BASE}} \quad (32)$$

Sendo f_{ei} a frequência de ocorrência de eventos de VTCD, em um período de 30 dias, para cada região de sensibilidade i , sendo $i = A, B, C, D, E, F, G, H$ e I ; f_{pond_i} o fator de ponderação para cada região de sensibilidade i , estabelecido de acordo com a relevância do evento, correlacionando sua amplitude e duração; FI_{BASE} o Fator de Impacto base, obtido do somatório dos produtos dos fatores de ponderação pelas frequências máximas de ocorrência em um período de 30 dias de VTCD para cada região de sensibilidade. O fator de ponderação e o fator de impacto de base são definidos segundo a Tabela 8 conforme norma da PRODIST.

Tabela 8 - Fator de ponderação em função da região de sensibilidade

Região de Sensibilidade	f_{pond}
A	0,00
B	0,04
C	0,07
D	0,15
E	0,25
F	0,36
G	0,07
H	0,02
I	0,04

Fonte:(ANEEL, 2021)

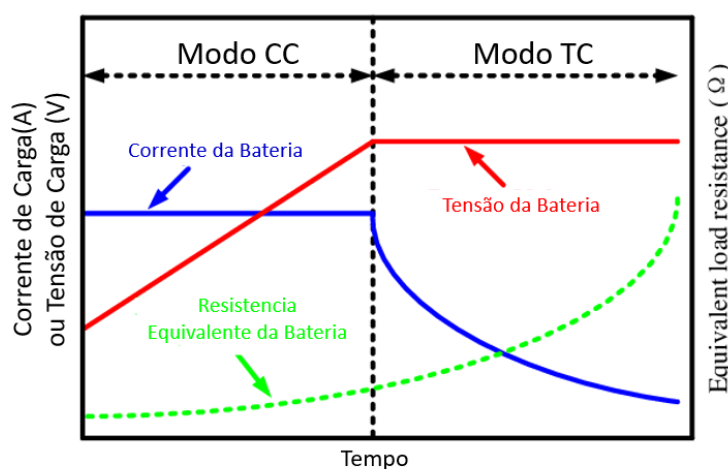
3.8 Impactos Elétricos decorrentes da Recarga de Veículos Elétricos

Dos principais pontos verificados referentes a qualidade da energia, alguns se destacam quando relacionados ao processo de carregamento dos VEs, conforme levantamento realizado em (Wang *et al.*, 2021). Os fenômenos de QEE que apresentam maior relevante são a injeção de harmônicas na rede, o fator de potência durante o processo de recarga e os *flickers* causados pelas flutuações de tensão. Este tópico descreve cada um dos pontos mencionados especificamente visando o levantamento de potenciais impactos e violações de indicadores de qualidade durante a recarga de veículos elétricos.

3.8.1 Flutuação de Tensão

O efeito da flutuação de tensão na rede causados pelo VE está associado ao processo de carregamento das células de bateria dos veículos, pois os principais modelos de carregadores disponíveis no mercado tendem a apresentar uma forma de carregamento com correntes variáveis no tempo (com um modo de carregamento em corrente constante e um modo em tensão constante), conforme ilustrado na Figura 11. É possível observar que durante o processo de carregamento, inicialmente há uma injeção constante de corrente e a tensão apresenta um comportamento variável (Modo de recarga em corrente constante – Modo CC), após o carregamento da bateria do VE atingir 80% da sua capacidade de carregamento total ocorre a inversão onde a tensão é mantida constante e a corrente apresenta um valor em decaimento (Modo de recarga em tensão constante – Modo TC) [REF]. Este comportamento associado à dinâmica de recarga dos carregadores pode provocar um processo de flutuação de tensão no ponto de conexão, em função da não linearidade da carga.

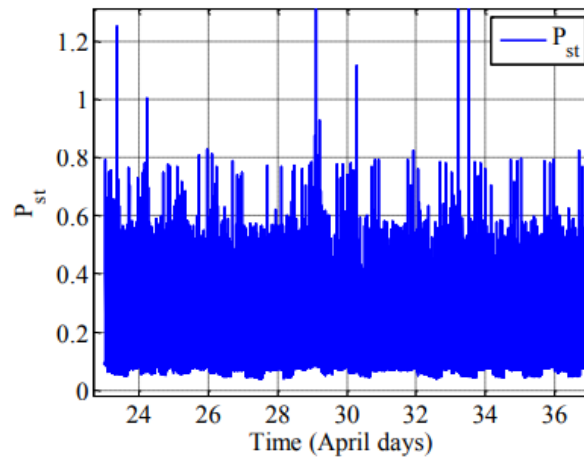
Figura 11 - Perfil de Carga durante carregamento de VE.



Fonte: (Wang *et al.*, 2021)

O trabalho descrito em (Thiringer; Haghbin, 2015) apresenta uma estação de recarga de 120 kW, que foi avaliada para o indicador *Pst* durante um período de 10 dias. Os resultados encontrados são apresentados na Figura 12. Observa-se que o indicador de qualidade avaliado atingiu valores maiores que seu limite normativo de 1 em pelo menos 4 situações.

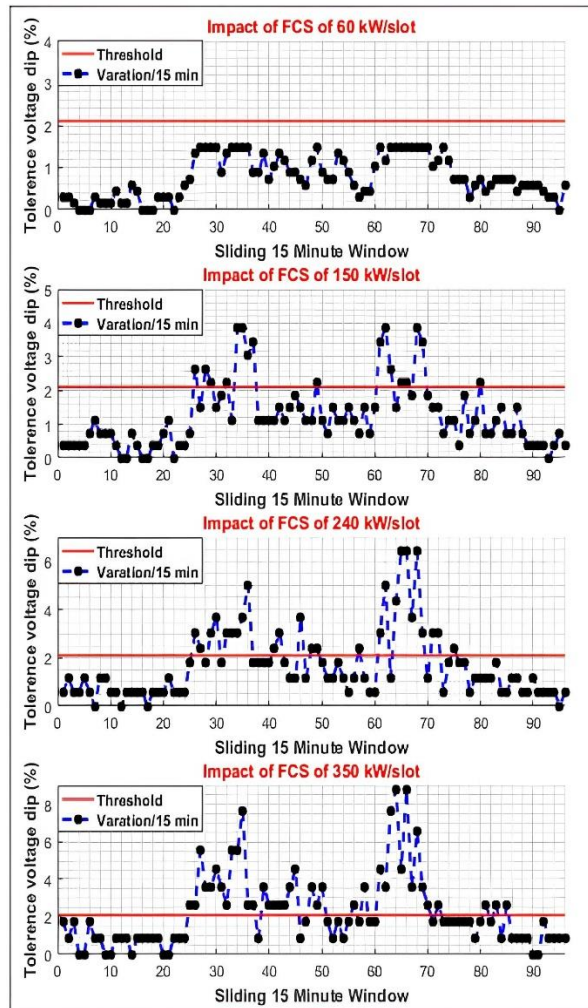
Figura 12 - Emissão de *Flickes* durante 10 dias.



Fonte:(Thiringer; Haghbin, 2015)

No levantamento apresentado em (Alshareef; Morsi, 2018) é realizada a avaliação das flutuações de tensão para diversas potencias de carregamento, os resultados são apresentados na Figura 13. O parâmetro analisado consiste na tolerância de afundamento de tensão para que não ocorra o processo de cintilação luminosa, observa-se que a partir de potência de carregamento de 150 kW há ultrapassagem do valor limite estabelecido (que no caso analisado é de 2%). As evidências corroboram com a premissa que a flutuação de tensão pode ser um potencial impacto da conexão do Eletroposto, contribuindo para a relevância de acompanhamento do indicador de flutuação de tensão no ponto de conexão.

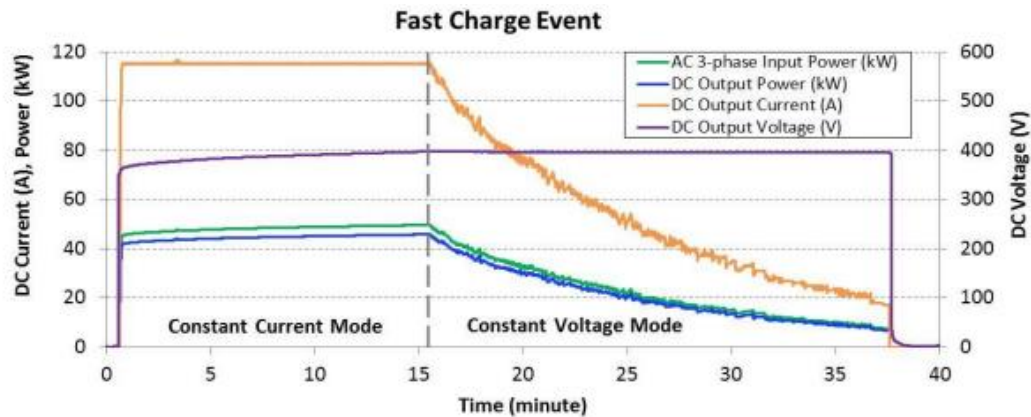
Figura 13 - Flutuação de tensão admissível e tolerância em função do tempo.



Fonte: (Alshareef; Morsi, 2018).

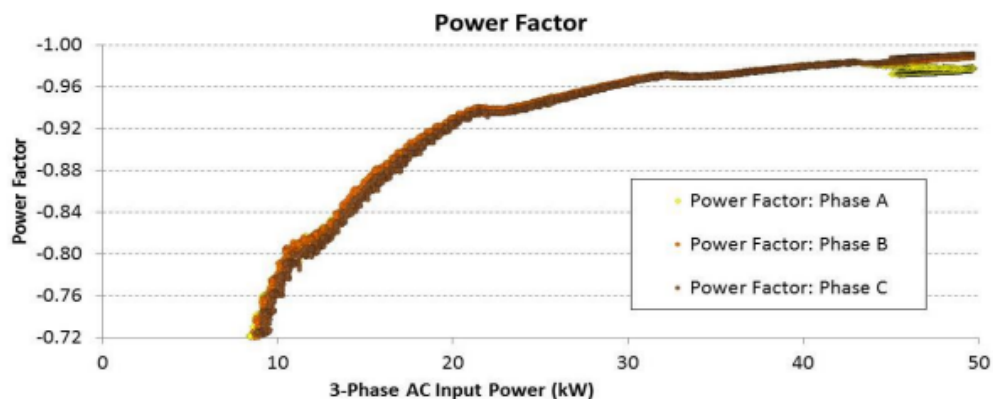
3.8.2 Fator de Potência

A Figura 14 ilustra as curvas de potência injetada no VE (que variam ao longo da recarga). Como consequência da variação das potências CA e CC, o fator de potência no PAC considerando somente o eletroposto pode apresentar variação no decorrer do carregamento. Observa-se por meio da figura que, no decorrer do tempo, o valor de potência na rede (representado em verde) tende a decrescer provocando um desbalanço da potência ativa em comparação a total. Desta forma, gerando o comportamento de variação do fator de potência.

Figura 14 - Evento de Carregamento Rápido.

Fonte: (Idaho National Laboratory, 2016).

A Figura 15 apresenta o comportamento do fator de potência na rede considerando esta variação de potência de recarga (o eixo x horizontal representa a potência de recarga). Observa-se nos pontos de operação com baixa potência, o fator de potência associado tende a ser baixo (inferior a 0,92). Desta forma, as evidências indicam que se deve manter o monitoramento do fator de potência no PAC. No caso do eletroposto com suporte de sistemas de armazenamento de energia e/ou de sistema de geração fotovoltaica, com conexão no mesmo PAC, o comportamento do fator de potência tende a ser mais estável em função da disponibilidade de potência ativa e capacidade de controlar a injeção de potência na rede.

Figura 15 - Variação de fator de potência em função da potência fornecida.

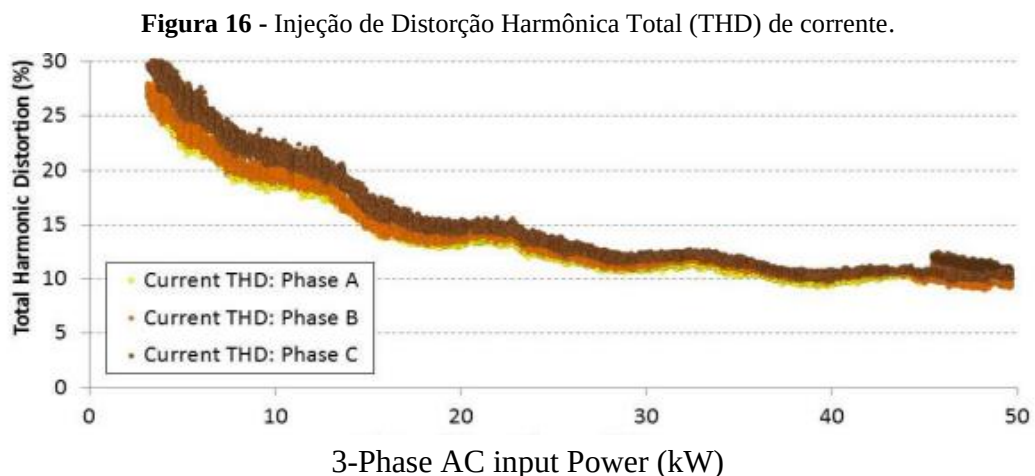
Fonte: (Idaho National Laboratory, 2016).

3.8.3 Distorções Harmônicas

Por fim, ainda em relação ao levantamento de impactos em potencial, a literatura técnica relata que um dos principais problemas associados a utilização de carregadores rápidos é a

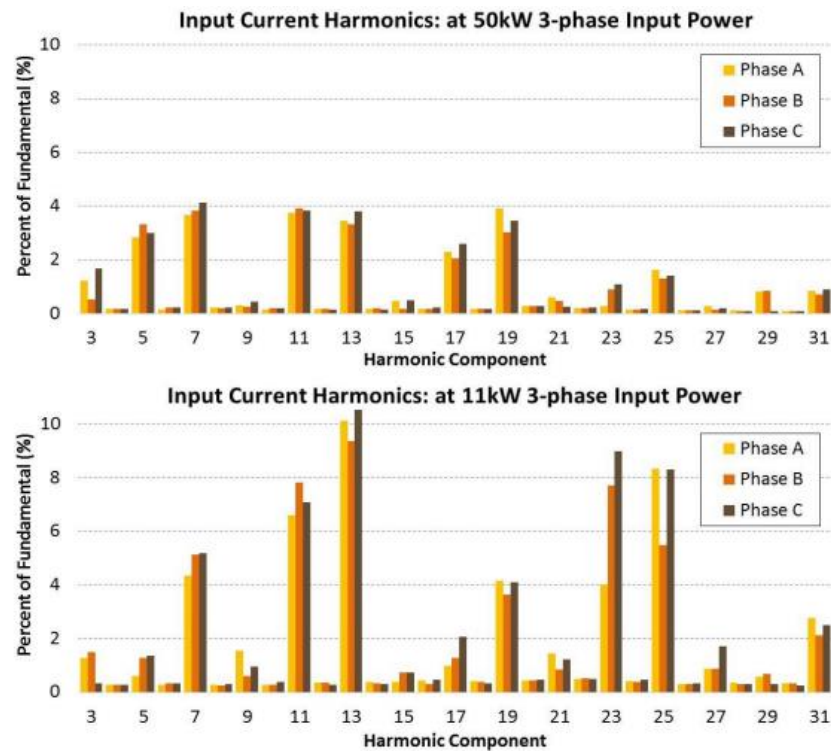
injeção de correntes harmônicas na rede, conforme descrito em (Di Paolo, 2018) e (Kazi *et al.*, 2021).

A ocorrência de distorções harmônicas está associada a não linearidade das cargas e à utilização de conversores chaveados de eletrônica de potência. O processo de chaveamento em alta frequência para realizar o controle do carregamento das baterias dos VEs tem como subprodutos componentes harmônicas nas correntes. A Figura 16 apresenta o indicador THD (*Total Harmonic Distortion*) de corrente de um carregador rápido de 50 kW em função da potência entregue ao veículo (potência solicitada à rede no ponto de conexão). Observa-se na Figura 16 que quanto menor a potência entregue ao VE, maior o THD injetado na rede. A Figura 17 apresenta a composição harmônica para os pontos de operação com utilização da potência associados aos plugs de 50 kW e 11 kW.



Fonte: (Idaho National Laboratory, 2016).

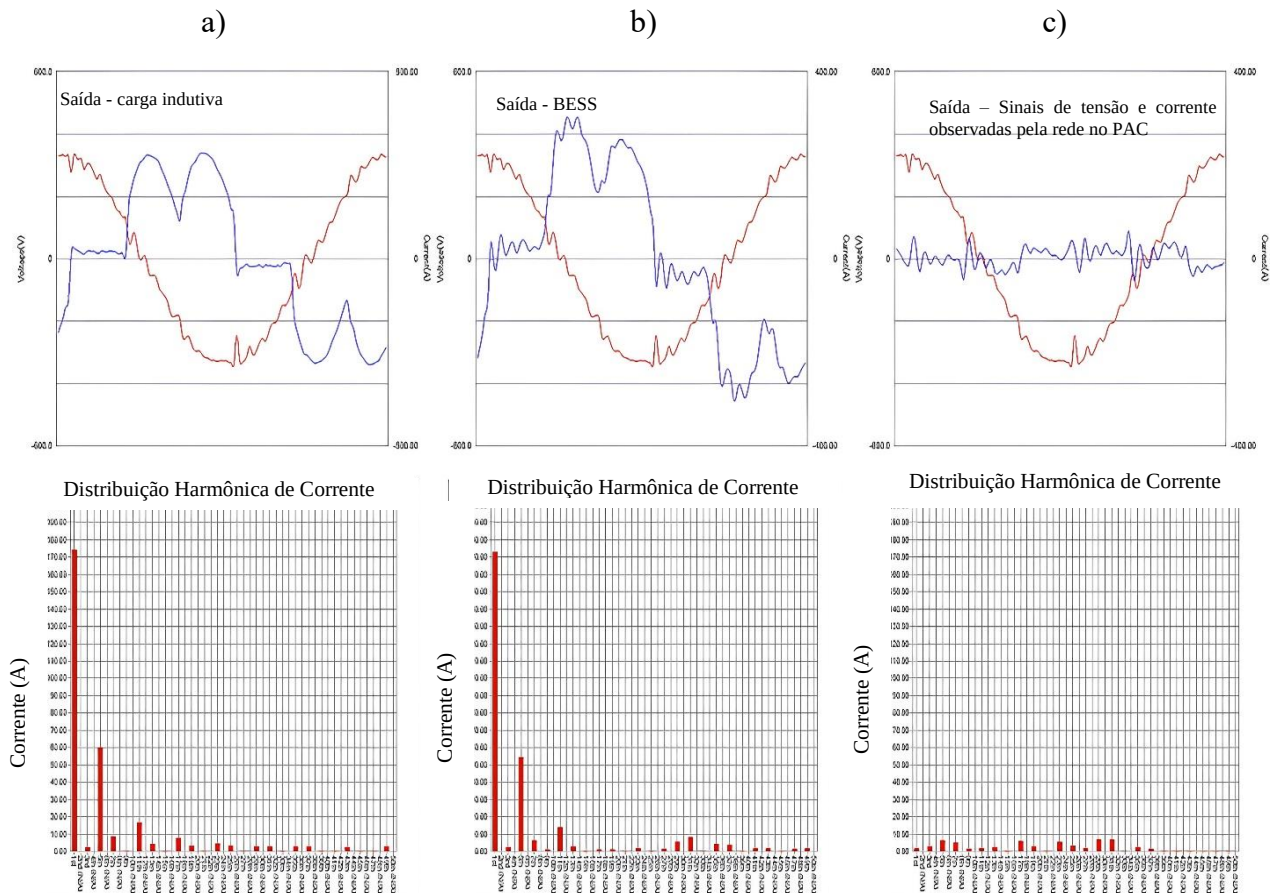
Observa-se por meio da Figura 17 que a composição de componentes harmônicas ímpares é superior às de múltiplo 3 e as associadas a pares e zero. O carregador empregado neste teste é do tipo de carregamento rápido de 50 kW (nominal).

Figura 17 - Composição Harmônica para potências de 50kW e 11 kW

Fonte:(Idaho National Laboratory, 2016).

Em (Barsali *et al.*, 2015) descreve-se um caso no qual há a aplicação de um BESS para a redução de componentes harmônicas em uma microrrede. A Figura 18 apresenta a forma de onda da tensão e corrente, antes e após a implantação do BESS. A tensão está representada em vermelho, a corrente em azul. Na figura a) está a saída de uma carga indutiva, na figura b) as medições do sistema de baterias e na figura c) estão os sinais vistos na rede (PAC). Observa-se que na figura da esquerda há distorção elevada (principalmente na forma de onda do sinal de corrente) e que com a utilização do sistema de baterias acoplado há uma redução real dos harmônicos associados observados no ponto de conexão a ocorrência deste fenômeno se dá pois o BESS sendo um sistema capacitivo que aumenta o efeito de estabilidade da rede, reduz as possíveis variações de tensão na rede.

Figura 18 – Tensão e Corrente para rede antes e depois do acoplamento de um sistema de armazenamento



Fonte: (Barsali *et al.*, 2015).

3.9 Conclusões do Capítulo

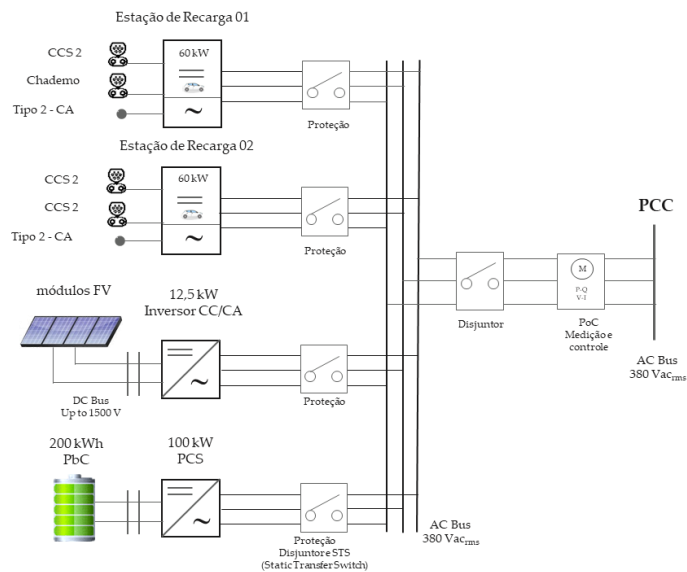
A análise dos impactos na rede elétrica no ponto de conexão de um eletroposto revela a importância de acompanhar e solucionar os potenciais problemas associados são eles: a flutuação de tensão, o fator de potência e as distorções harmônicas. Estratégias como o uso de baterias de armazenamento de energia podem ajudar a mitigar os impactos. É essencial adotar medidas preventivas para garantir um sistema de recarga de veículos elétricos estável e eficiente. Uma das estratégias para mitigar potenciais impactos é analisar de maneira preditiva, por meio da simulação da conexão. Neste sentido, no próximo capítulo será apresentada uma estratégia para simulação de estações de recarga conectadas à rede de distribuição.

4. SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO DO ELETROPOSTO

4.1 Estudo de Caso – Projeto Eletroposto Sustentável CS3059

O eletroposto apresentado na Figura 19 no eletroposto implanto no Projeto de P&D PD-00063-3059/2019 - Soluções de Apoio à Expansão da Infraestrutura de Recarga para Veículos Elétricos: Estações de Recarga Integradas a Tecnologia Nacional de Bateria (Chumbo-Carbono, PbC) e Sistemas Fotovoltaicos (PV)" foi aprovado no âmbito do programa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), na iniciativa estratégica 022/2018. O projeto tem como proponente a distribuidora de energia CPFL Energia e como entidades executoras, a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), o Instituto de Tecnologia Edson Mororó Moura (ITEMM), Acumuladores Moura e o Instituto Avançado de Tecnologia e Inovação (IATI).

Figura 19- Eletroposto com Estações de Recarga Rápida com PV e BESS - Diagrama Simplificado.

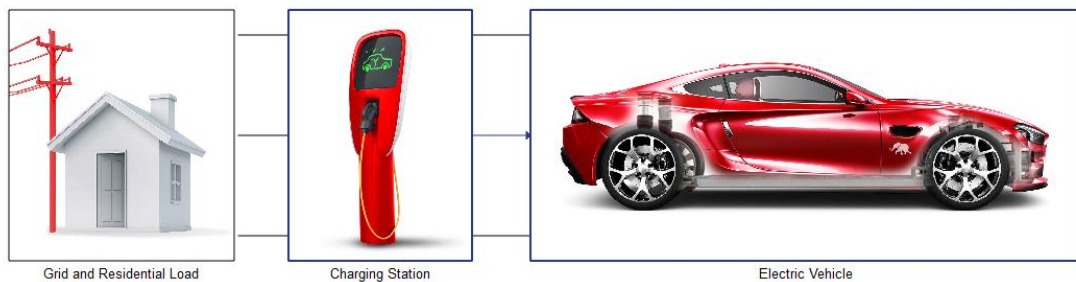


Onde o sistema fotovoltaico é composto por um inversor de 12,5 kW/13,2 kWpico. As duas estações de recarga rápida (60 kW DC + 22 kW AC de potência nominal, equipadas com terminais de plugs CCS2, CHAdEMO e AC Tipo 2) são conectadas ao barramento CA e também podem ser BESS de Chumbo-Carbono de 100 kW/200 kWh (também com conexão à rede). Tendo como base o eletroposto implementado foram desenvolvidos Simulações para emular a operação do sistema por meio do simulador Typhoon Hill.

4.2 Modelo de simulação do eletroposto.

O modelo de simulação foi desenvolvido segundo as características do projeto conforme mencionado. O enfoque do modelo de simulação é avaliar diferentes pontos de operação (críticos) e capturar indicadores de qualidade em cenários de difícil reprodução em campo. O modelo utilizado para representar as estações de recarga está ilustrado por meio da Figura 20.

Figura 20 - Modelo de simulação inicial da operação do eletroposto.



Para simular a operação dos conversores das estações de recarga os blocos devem representar a operação no nível de chaveamento. Os blocos neste nível de operação são apresentados nas Figura 21, Figura 22 e Figura 23.

Figura 21 - Modelo de representação em nível de chaveamento da rede elétrica

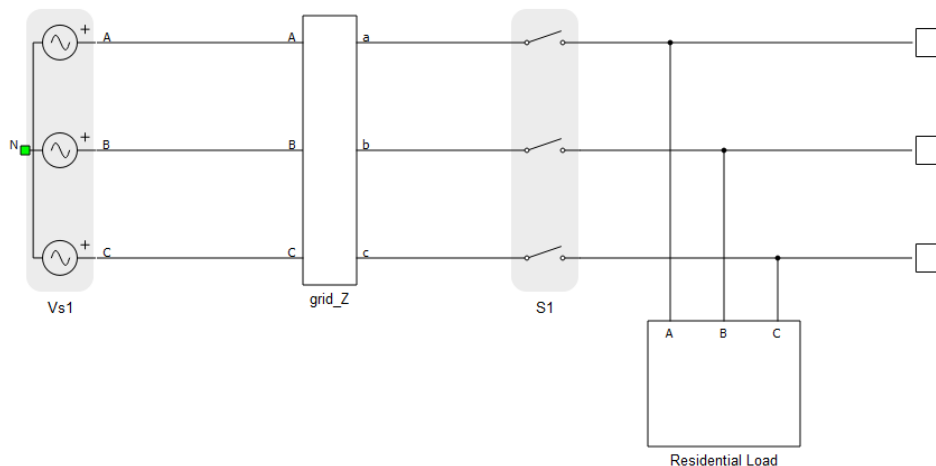


Figura 22 - Modelo de representação em nível de chaveamento da estação de recarga.

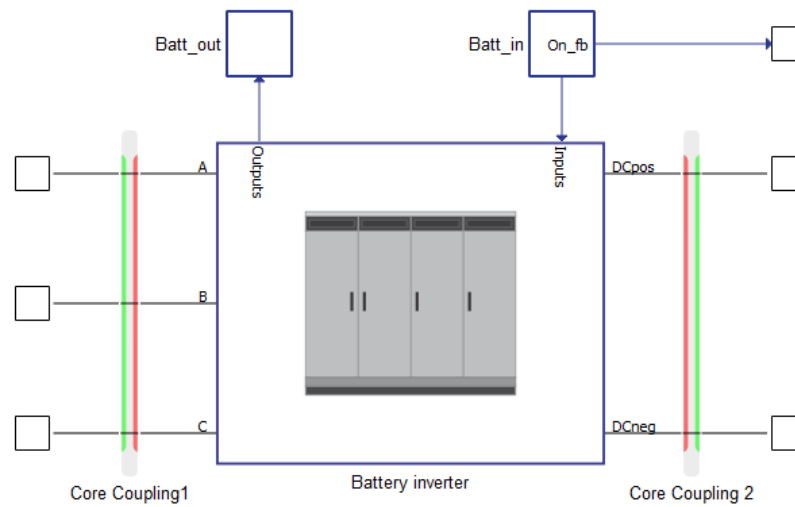
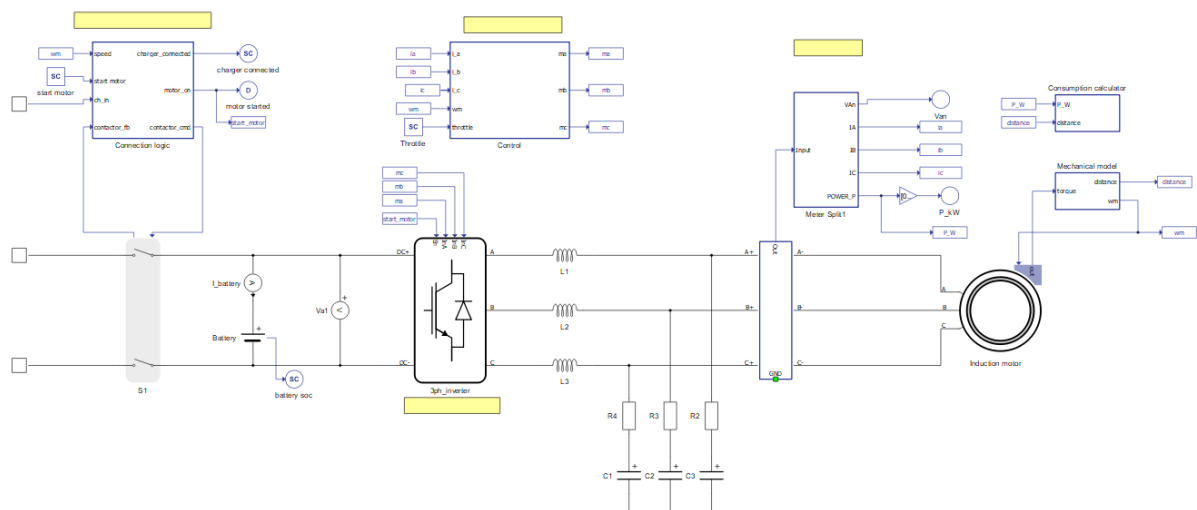


Figura 23 - Modelo de representação em nível de chaveamento do veículo elétrico.



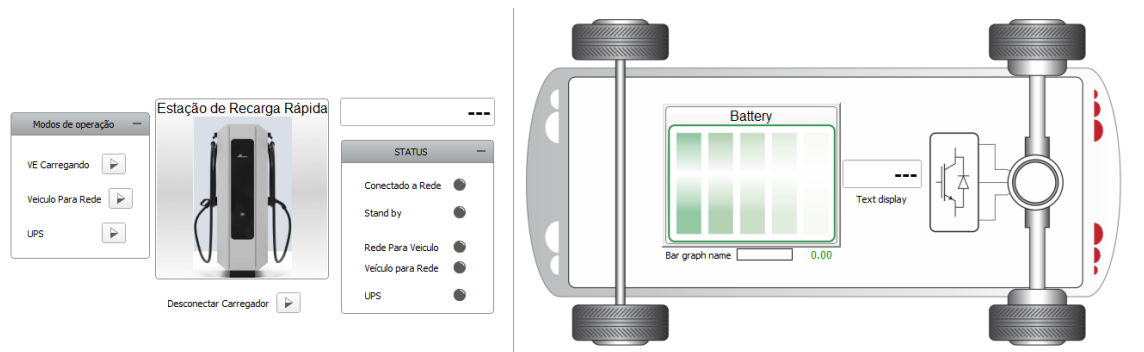
A simulação foi implementada segundo as características de rede presentes no local analisado que consiste no valor de 380Vrms de tensão (entre fases), 60 Hz de frequência e fator de potência de 0,95. Também foi implementado as condições do carregador segundo especificado para a localidade, como também a inserção do sistema de medição conforme apresentado na Figura 24.

Figura 24 - Modelo de simulação de eletroposto utilizado.



A Figura 24 apresenta o modelo utilizado para a simulação, dotada da representação do qualímetro e com a estação de recarga equivalente ao modelo NB60 (modelo utilizado no projeto CS3059). Para o monitoramento e medição em tempo real é necessário a implementação do painel de controle, conforme apresentado na Figura 25.

Figura 25 - Painel de monitoramento do eletroposto.



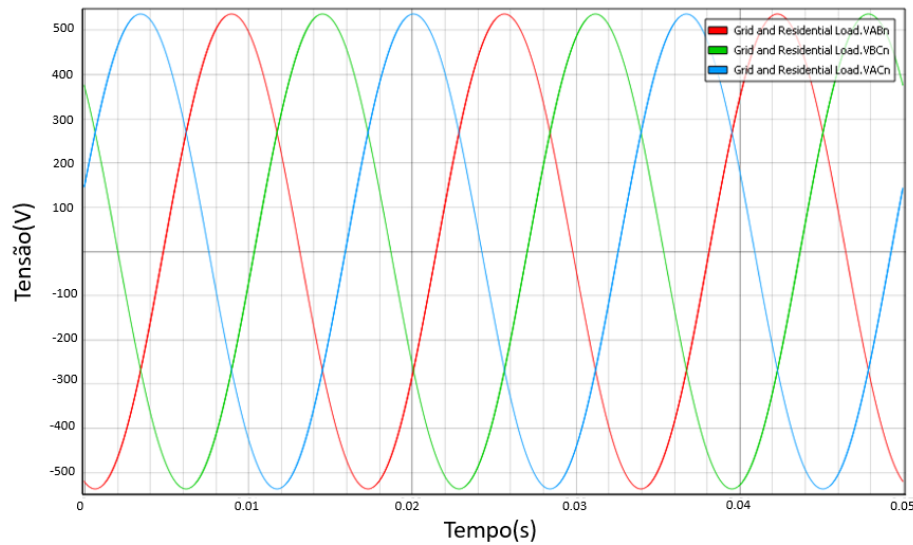
No painel ilustrado na Figura 25 é realizado medições de sinais em tempo real, bem como efetuar ajustes na simulação em parâmetros como as potências ativas, potência reativa e frequência de operação dos carregadores. Outra funcionalidade do painel consiste em ativar os modos de operação da simulação, são eles: (1) carregador desconectado, (2) Veículo Elétrico Carregando e (3) Veículo para rede no modo de operação como V2G (A opção V2G consiste em utilizar a energia armazenado no veículo para fornecimento de potência à rede e não será possível reproduzir nos carregadores reais que não são habilitados para *Vehicle to grid* - V2G).

Considerando o modelo de simulação desenvolvido, neste capítulo será descrita a análise do comportamento dos parâmetros de qualidade no ponto de acoplamento à rede durante o processo de recarga dos veículos elétricos. Serão apresentados 3 pontos de operação - utilizando como referência o nível da bateria no veículo: 50% de estado de carga da bateria para representa um nível de bateria comum , 5% de SoC (*State of Charge*) da bateria e 95% de SoC da bateria para representar pontos críticos da operação, conforme apresentado nos tópicos a seguir.

4.3 Simulação da Operação com a Estação de Recarga desconectada

A Figura 26 ilustra a tensão entre fases no ponto de conexão em medições com o carregador desconectado (grandezas básicas para serem utilizadas como referências nas medições).

Figura 26 - Tensão de Linha na rede com carregador desconectado



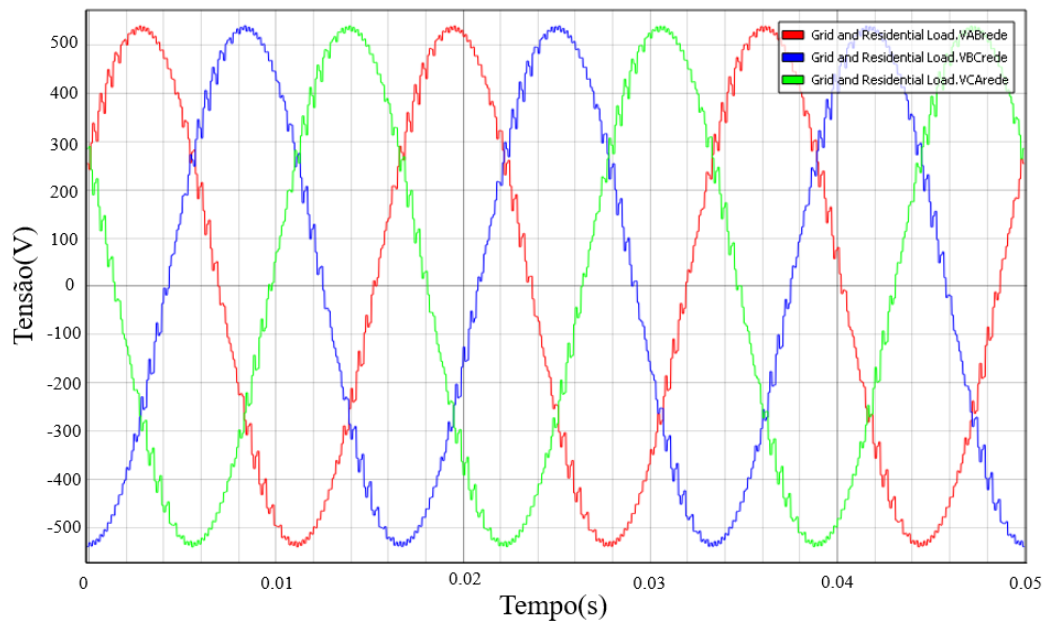
Também foram avaliadas as variações de tensão e distorções harmônicas. Observou-se que sem a presença do carregamento as variações e distorções são equivalentes a zero. De fato, como a simulação consiste em uma rede praticamente ideal (a rede é modelada como uma fonte de tensão ideal conectada por meio de uma impedância de acoplamento ideal), efetivamente não devem ser observadas inconformidades na tensão.

Os tópicos a seguir apresentam resultados de medição (obtidas por meio do SCADA) via simulação. Como descrito anteriormente, são avaliados os cenários com diferentes pontos de operação inicial para o estado de carga da bateria do veículo elétrico, isto é, 50% de estado de carga da bateria do veículo, 5% de SOC da bateria e 95% de SOC da bateria.

4.4 Carregamento em 50% do SoC no VE

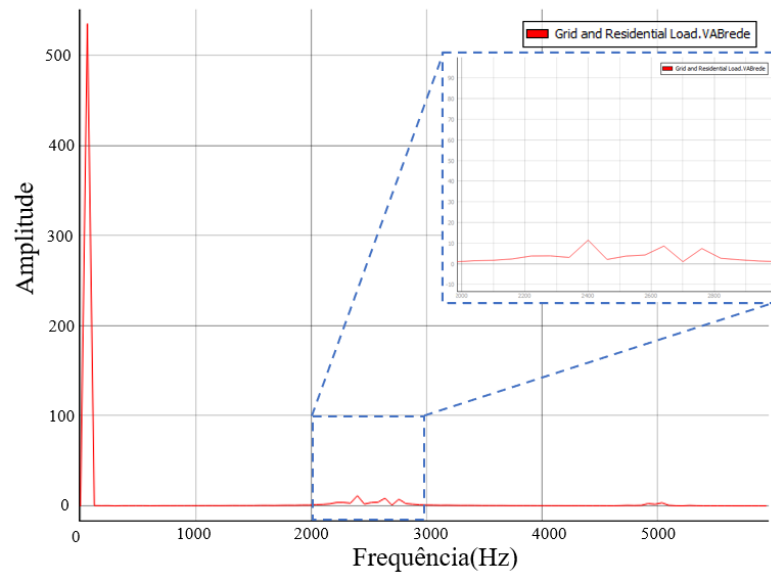
O ponto definido para análise consiste na exata metade da carga da bateria. Trata-se de um ponto de operação onde o comportamento do carregamento encontra-se em um estado médio (distante dos limites operativos de 0 e 100%). A Figura 27 apresenta o comportamento da tensão de rede para este nível de carregamento.

Figura 27 - Tensão de Linha na rede para SOC 50%.



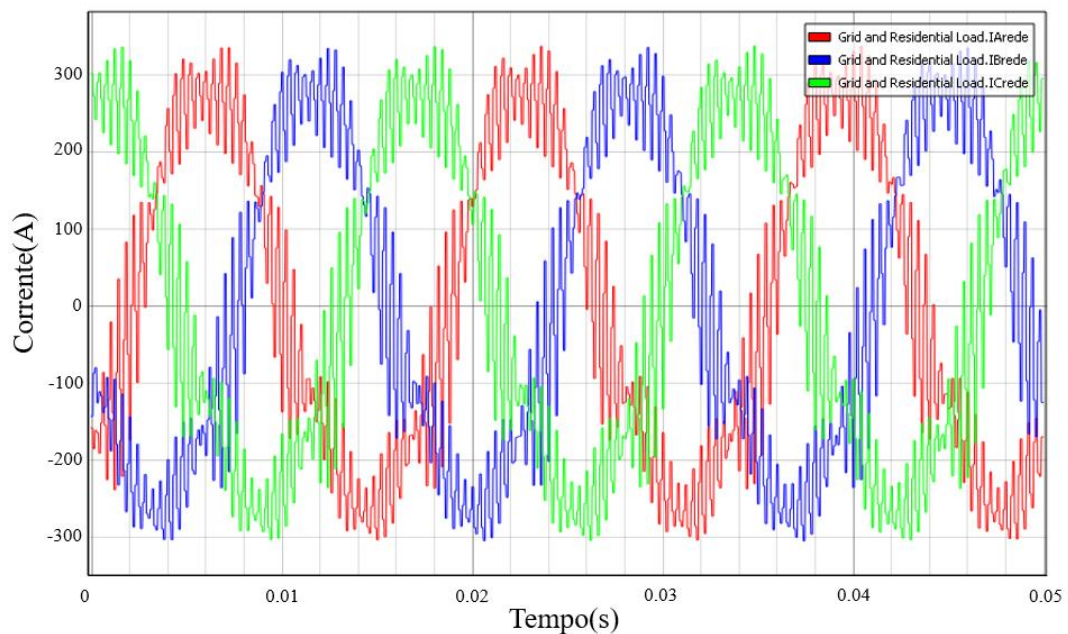
Na Figura 27 se observa a presença de distorções na forma de onda da tensão na rede. Tais deformidades são provocadas pelo carregamento do VE, uma vez que a estação de recarga é um conversor eletrônico com chaveamento. O espectro com as componentes harmônicas do sinal da Tensão de linha é apresentado na Figura 28. Observa-se que a componente fundamental é preponderante (apesar das distorções, o sinal de tensão se mante próximo a um sinal senoidal perfeito). A distribuição harmônica do sinal de tensão entre fases apresenta a ocorrência de componentes harmônicos em múltiplos da frequência de chaveamento (definida para a simulação em 2500 Hz).

Figura 28 - Distribuição Harmônica da Tensão de Linha - para o modo com SoC 50%.



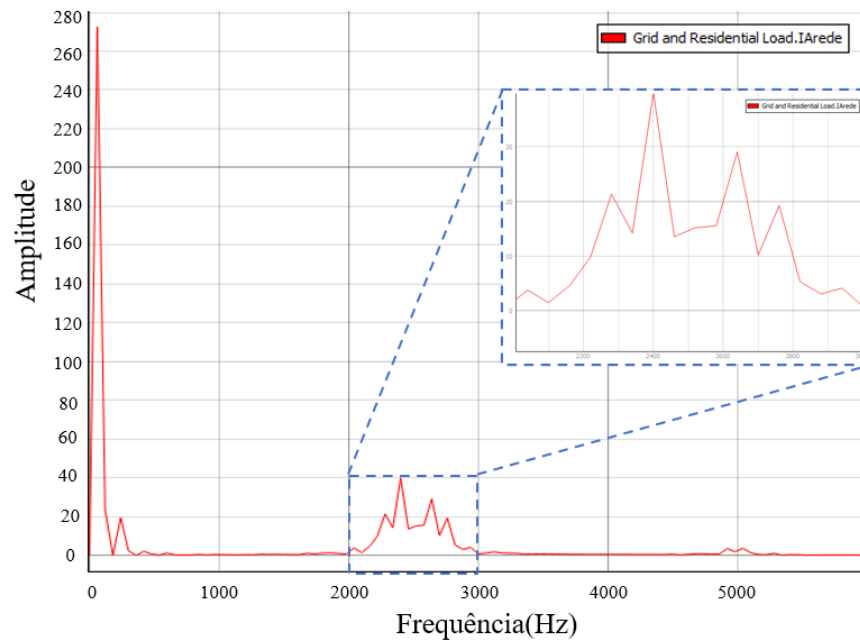
Para o caso da corrente, as distorções harmônicas resultantes do chaveamento do conversor são mais evidentes, como ilustrado por meio da Figura 29 (que apresenta a forma de onda das correntes em cada uma das fases das estações de recarga).

Figura 29 - Corrente na rede para SOC de 50%.



Por meio da Figura 30 é possível observar a distribuição das componentes harmônica do sinal de corrente de rede. Conforme esperado, a forma de onda da corrente apresenta uma maior intensidade de componentes harmônicas concentrados em baixas frequências e próximas aos múltiplos da frequência de chaveamento.

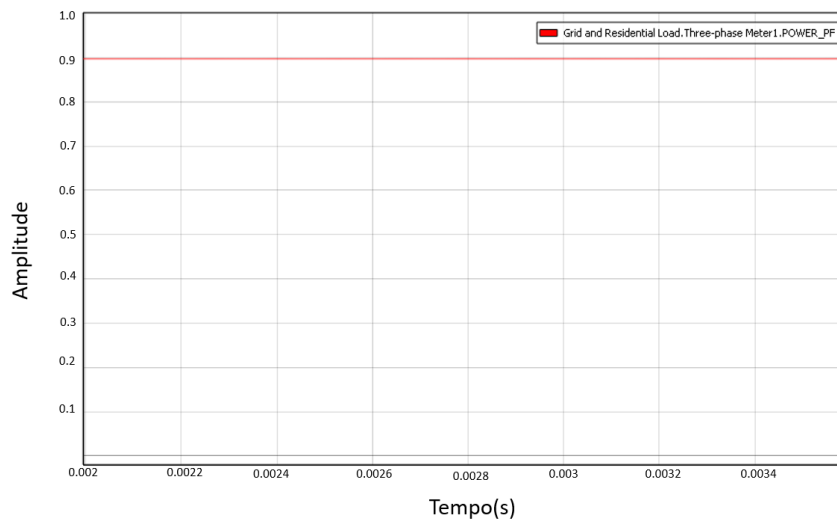
Figura 30 - Distribuição Harmônica da Corrente para SOC 50%.



Outro ponto relevante, conforme levantamento anterior dos possíveis problemas causados pela implementação do carregamento de VE na rede, consiste no fator de potência. A simulação do fator de potência pode ser observada na Figura 31.

Por meio da Figura 31 é possível observar que o fator de potência da rede apresenta uma redução durante o carregamento do VE excursionado de 0,95 para um valor médio de 0,8971. Com a implementação do conjunto de baterias é esperado que o fator potência tenha menor variações ou até que permaneça estável durante todo o processo de carregamento (em função do pequeno intervalo de observação simulado).

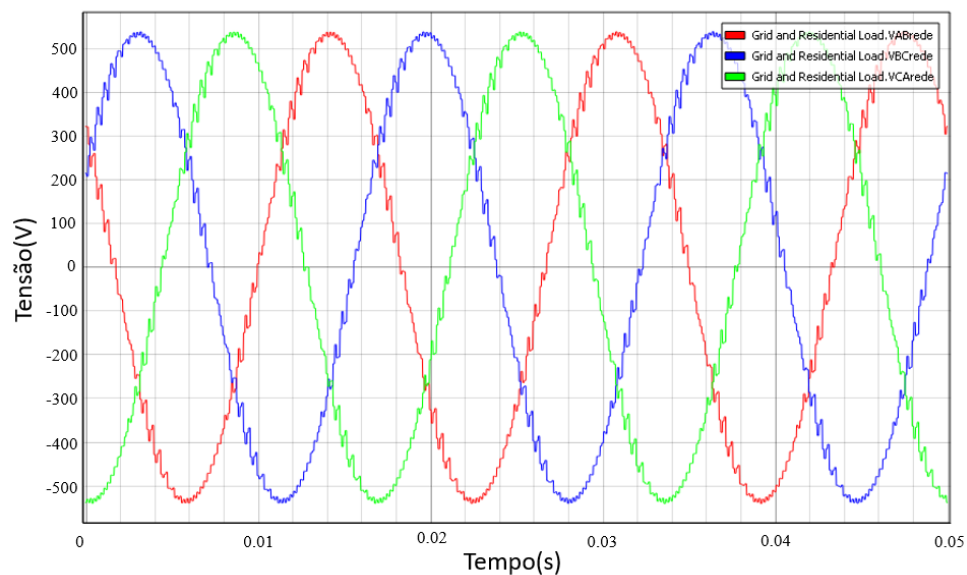
Figura 31 - Fator de Potência na rede para SOC 50%.



4.5 Carregamento com SoC inicial do VE em 5%

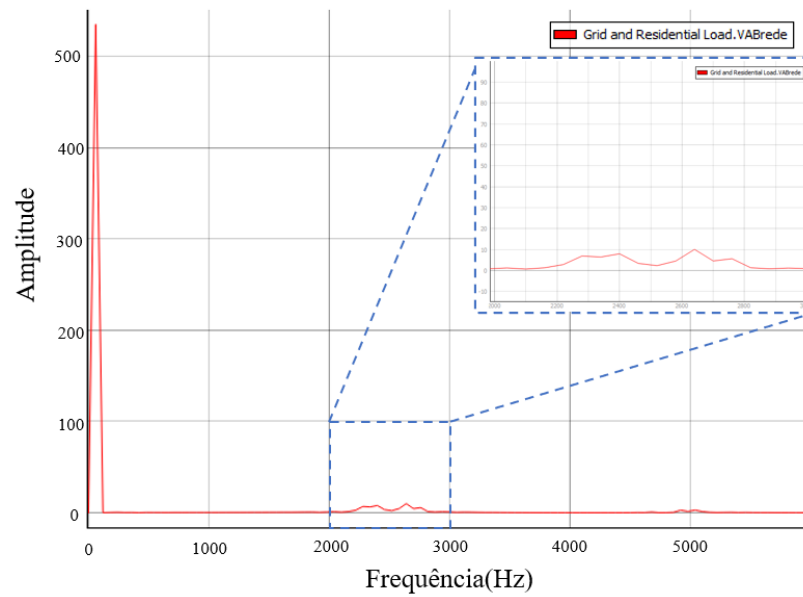
O segundo cenário simulado representa um ponto de operação onde a bateria do veículo está em um nível baixo, podendo resultar em elevada potência suprida no carregador (elevadas correntes). Este ponto foi selecionado também por refletir um nível de bateria que normalmente não é esperado ser encontrado em medições reais – uma vez que se recomenda que as baterias dos VEs sejam mantidas com SoC de 20 a 80%. A Figura 32 apresenta a forma de onda tensão de linha para o nível de carregamento de 5%.

Figura 32 - Tensão de Linha na rede para SOC 5%.



O resultado encontrado na Figura 32 é semelhante ao encontrado para o carregamento de 50% pois durante este período o carregador apresenta uma estabilidade de envio de potência. A **Figura 33** apresenta a distribuição do sinal de tensão de linha para o carregamento de 5%. Semelhante a distribuição harmônica para o carregamento de 50%, a distribuição das componentes harmônicas no sinal de tensão apresenta relativamente baixa distorção.

Figura 33 - Distribuição Harmônica da Tensão de Linha para SOC 5%.



A forma de onda da corrente fornecida pela rede está apresentada na Figura 34. Conforme esperado, a Figura 34 apresenta um maior distorção tendo picos de amplitude de corrente maiores que para os casos de carregamento em 50%. A distribuição das componentes harmônicas de corrente da Figura 34 está apresentado na Figura 35 – observa-se que a distribuição harmônica continua semelhante ao caso do carregamento com SoC inicial em 50%.

Figura 34 - Corrente na rede para SOC 5%.

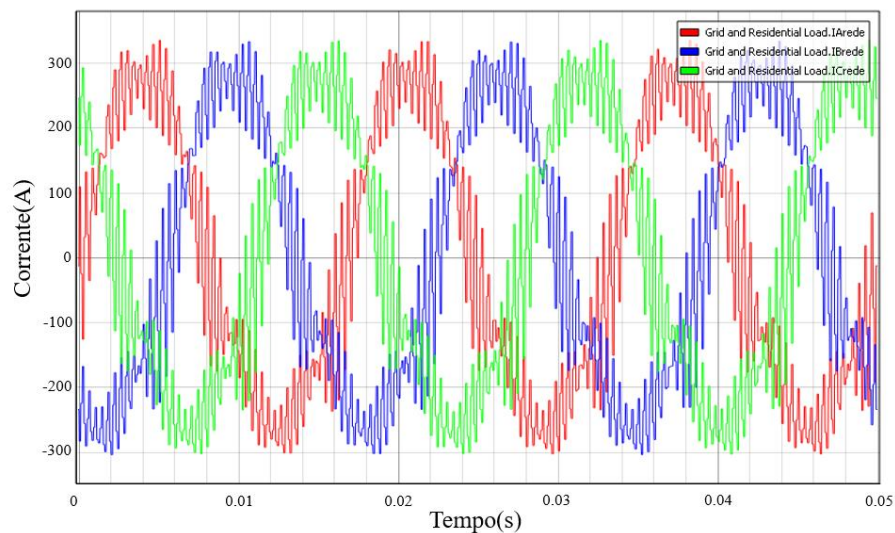
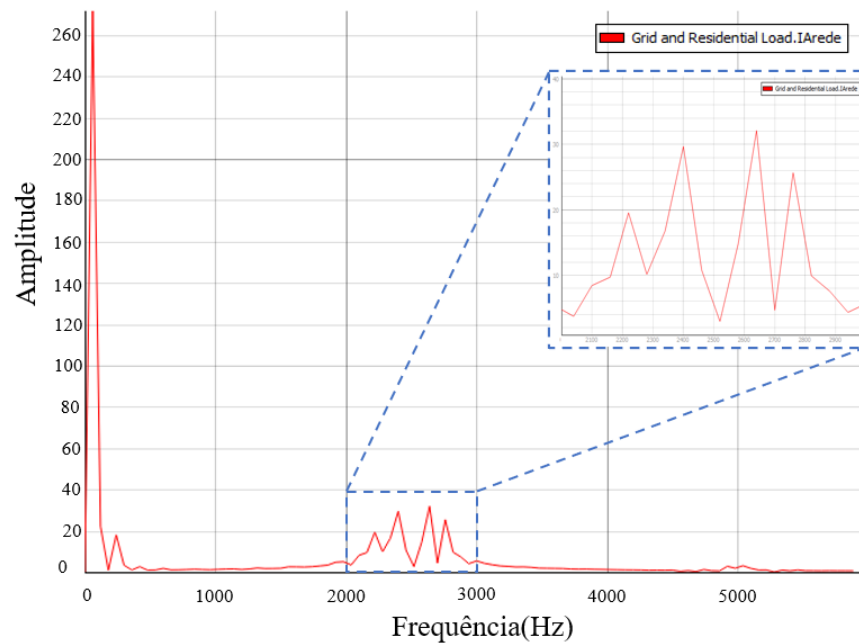
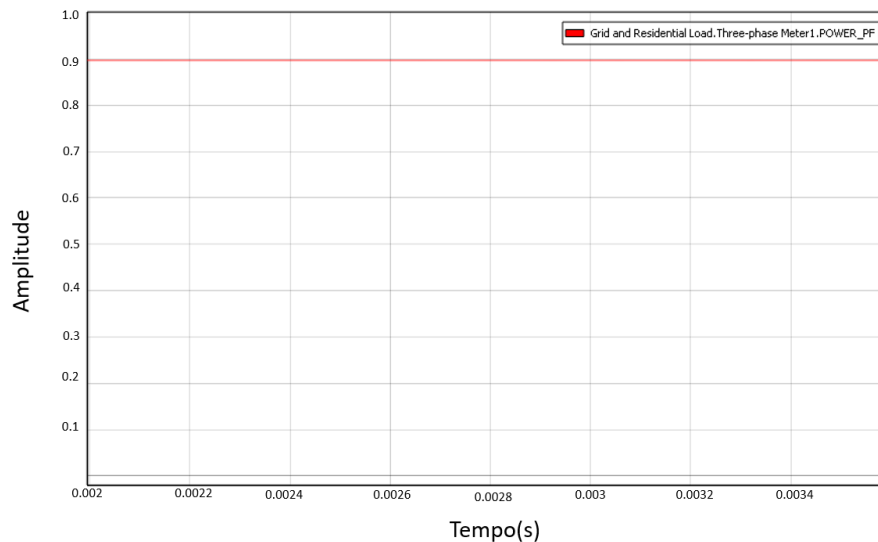


Figura 35 - Distribuição Harmônica da Corrente para SOC 5%.



A Figura 36 apresenta o comportamento do fator de potência para o nível de 5% de carregamento. O fator de potência apresenta o valor médio de 0,893, sendo um pouco maior que a medição para o carregamento a 50%.

Figura 36 - Fator de Potência na rede para SOC 5%.



4.6 Carregamento em 95% do VE

O último cenário simulado é selecionado por se tratar de um ponto de operação onde a bateria do veículo está em um nível próximo ao carregamento máximo com SoC no nível de 95% (simulação do processo de recarga iniciando em um veículo com a bateria quase totalmente

carregada). Neste ponto, espera-se que a corrente fornecida ao veículo seja baixa e consequentemente potência demandada pelo carregador seja inferior ao valor nominal. De fato, observou-se na simulação que a potência solicitada foi de apenas 12 kW (10% do total). Este ponto também representa um nível de bateria dos veículos fora da faixa usual (de 20 a 80%). O objetivo inicial de simular este ponto é também avaliar possíveis operações com os conversores operando próximos aos pontos de modo de condução descontínuo.

A Figura 37 apresenta a tensão de linha para o nível de carregamento de 95%. Observa-se que para a condição avaliada a tensão de linha apresenta um comportamento semelhantes aos outros pontos avaliados - com baixos níveis de distorção harmônica. A Figura 38 apresenta a distribuição harmônica da tensão para o carregamento de 95%.

Figura 37 - Tensão de Linha na rede para SOC 95%.

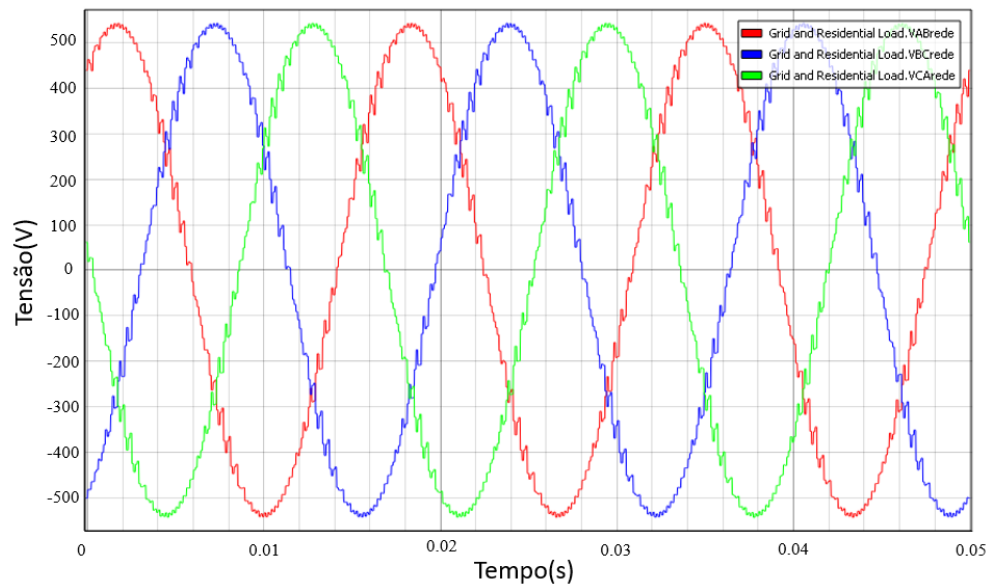
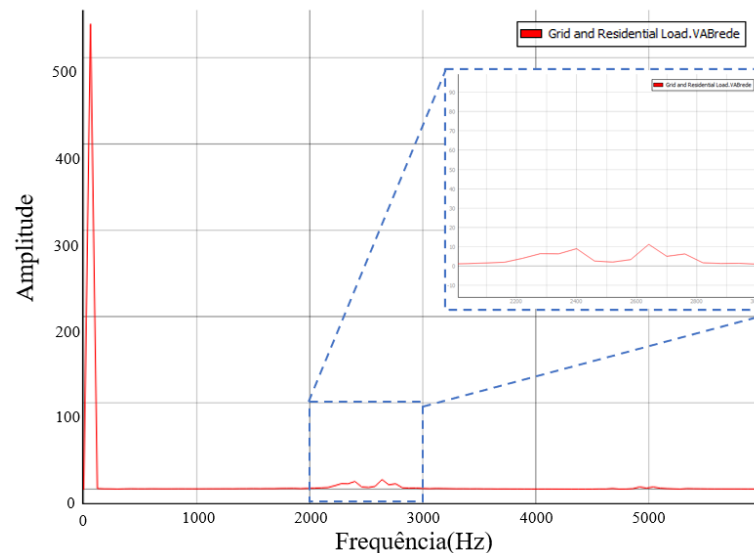
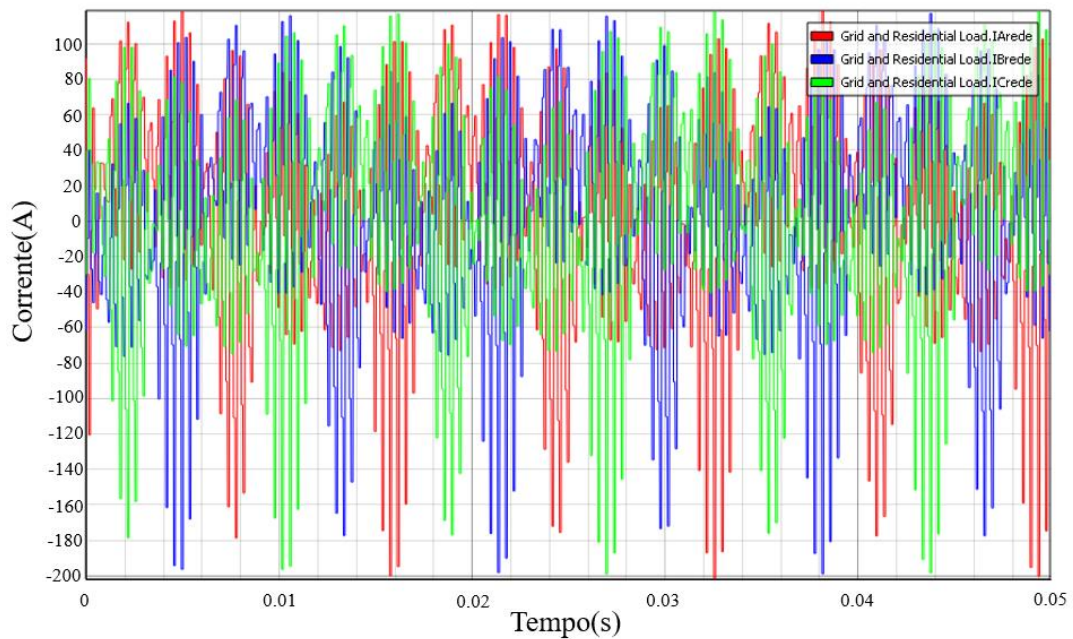


Figura 38 - Distribuição Harmônica da Tensão de Linha para SOC 95%.



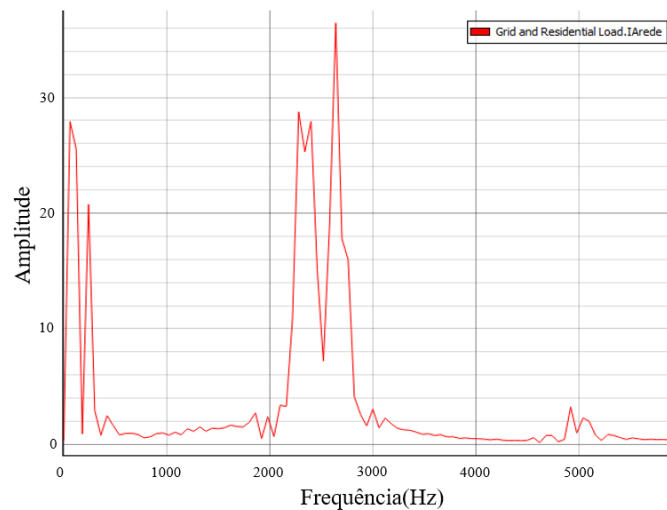
No caso da corrente de rede para o carregamento de 95%, apresentado na Figura 39, é notável visualmente que apresenta uma distorção harmônica ainda maior quando comparados aos outros pontos de operação.

Figura 39 - Corrente na rede para SOC 95%



A ocorrência do aumento de índice harmônico de corrente é devido à baixa potência requerida pelo VE, levando a um aumento considerável dos harmônicos causados pelo chaveamento dos carregadores. A distribuição das componentes harmônicas deste sinal de corrente está apresentada na Figura 40.

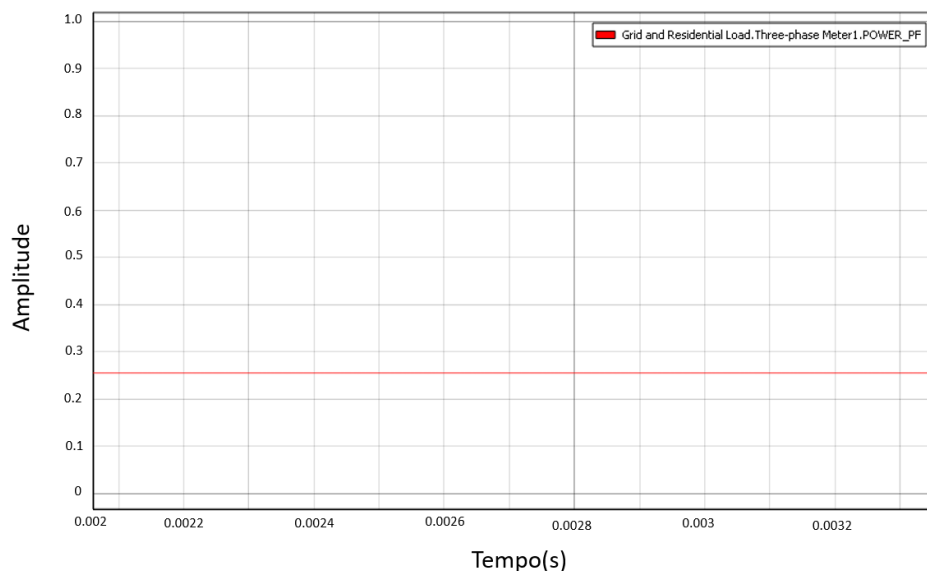
Figura 40 - Distribuição Harmônica da Corrente para SOC 95%.



Observa-se na Figura 40 que a distribuição harmônica da corrente, conforme esperado, apresenta um grau de distribuição entre a faixa avaliada. As maiores amplitudes das componentes ocorrem principalmente em baixas frequências e próximas a frequência de chaveamento de 2500 Hz.

No caso do fator de potência, apresentado na Figura 41, é possível observar que apresenta uma redução significativa - tendo como valor médio de 0,2552. Conforme os requisitos do PRODIST, o fator de potência deve permanecer em 0,95. Portanto, nestes pontos de operação, a implementação do sistema de armazenamento - BESS deve atuar para a correção deste possível problema que pode ocorrer durante o processo de operação do eletroposto.

Figura 41 - Fator de Potência na rede para SOC 95%



Em resumo, considerando o modelo desenvolvido e as simulações, observou-se baixa distorção harmônica no sinal da forma de onda da tensão nos cenários avaliados. Sendo possível concluir que em condições normais de operação dentro de toda a faixa de carregamento, os indicadores de distorção devem ser mantidos e não são esperadas violações. Argumento semelhantes para os sinais de frequência elétrica. Por outro lado, podem surgir pontos de atenção relacionados a distorções na forma de onda dos sinais de corrente elétrica, bem como pontos de operação com baixo fator de potência.

4.7 Efeito da Conexão de Estação de Recarga em Ponto de Conexão Compartilhado

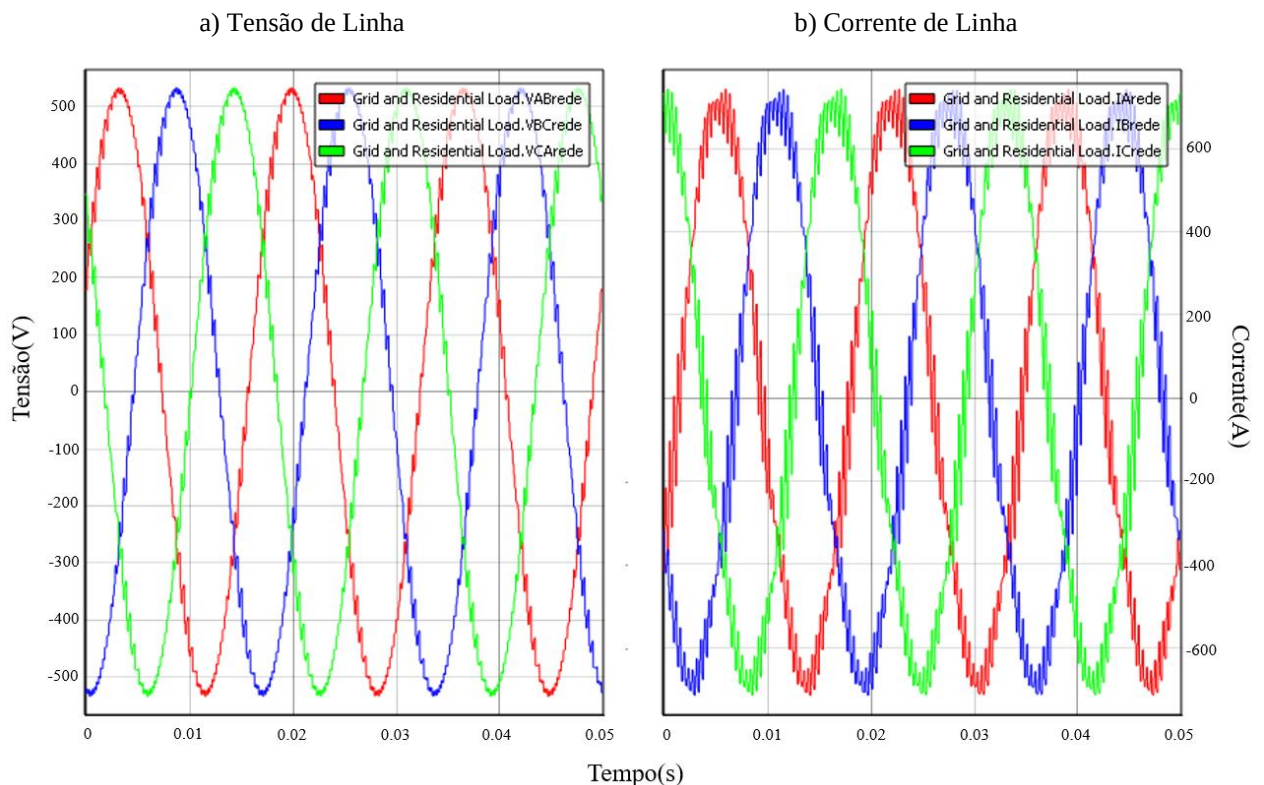
Após a implementação da estação de recarga, uma carga de 190kW foi conectada à rede da simulação - representando o comportamento de carga do empreendimento a qual a estação

de recarga estará localizada (exemplo associado ao projeto CAS3059). A seguir serão apresentados os resultados de simulação do estado da rede, nas novas condições, considerando os estados de SOC do VE de 50%,95%,5%.

4.7.1 Carregamento em 50% do VE com carga Fixa

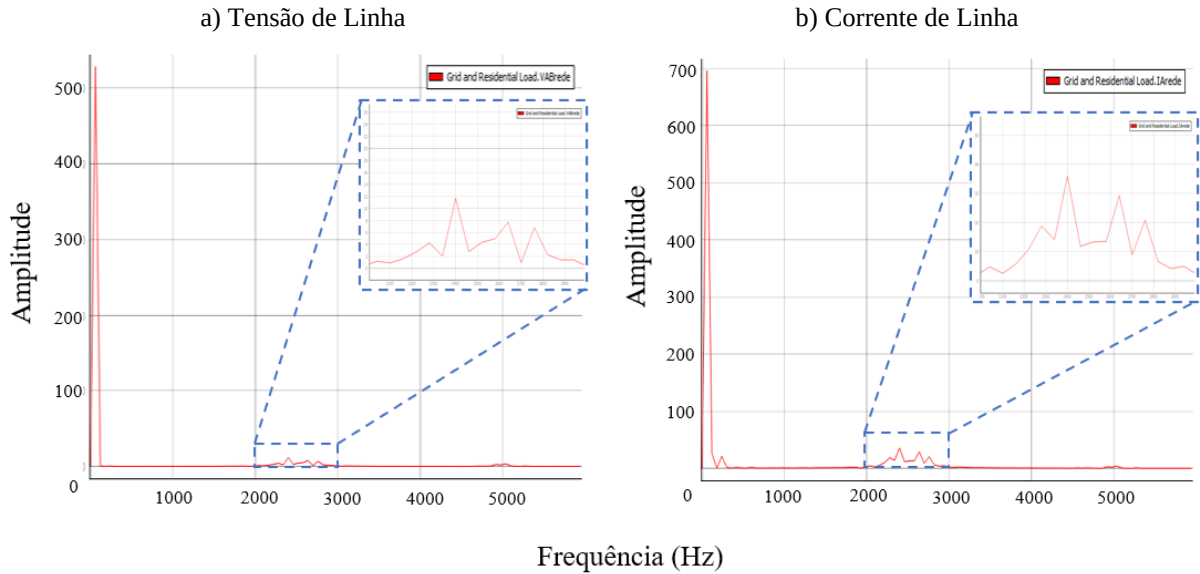
Inicialmente foi avaliado para o ponto médio de operação com início da recarga com SOC inicial de 50%. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta o comportamento da rede para este nível de SOC. No aspecto de Tensão de linha não houve alterações significativas com relação a operação sem a presença da carga, No entanto no ponto de vista do comportamento de corrente houve uma melhora significativa do comportamento tornando visualmente mais próxima o comportamento de uma senoide ideal com as componentes harmônicas do sinal de tensão de linha é apresentado na **Figura 42** **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

Figura 42 - Comportamento da rede para SOC 50% com carga fixa.



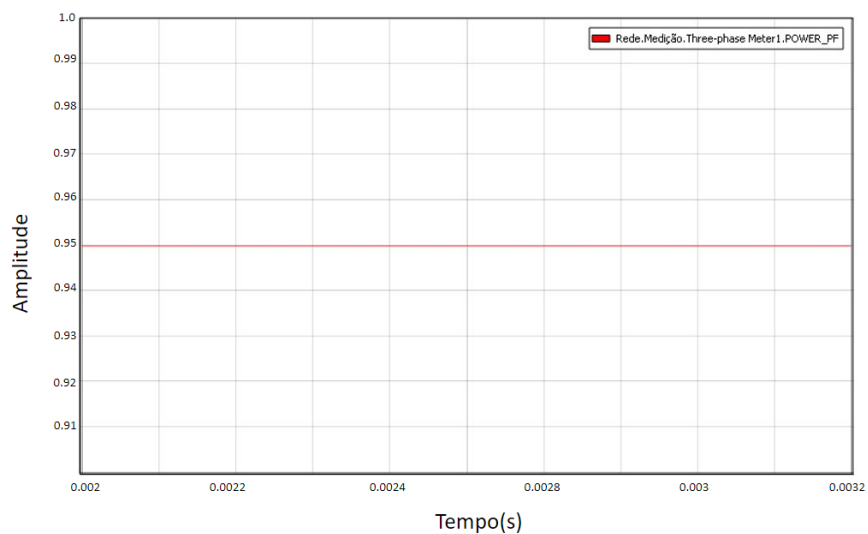
Na Figura 43 é apresentada a distribuição harmônica tanto da tensão de linha como para a corrente de linha, conforme esperado a componente fundamental tanto da tensão como da corrente é preponderante. É que a distorção causada pelo espectro harmônico na tensão se encontra abaixo do valor solicitado para a conexão pela concessionária.

Figura 43 - Distribuição Harmônica para SOC 50% com carga fixa.



Referente ao da distribuição das componentes harmônica do sinal de corrente da rede. A forma de onda da corrente apresenta uma grande redução das componentes harmônicas esta ocorrência se dá principalmente pois a carga fixa apresenta uma potência maior que a potência máxima do carregado minimizando o efeito de harmônico pelo chaveamento, Por meio da Figura 44 é possível observar que o fator de potência da rede permanece praticamente estável no valor de 0.95, com a implementação do sistema de carga fixa.

Figura 44 - Fator de Potência na rede para SOC 50%.



4.7.2 Carregamento em 5% do VE com carga Fixa

O segundo cenário consiste no ponto de operação onde a SOC está em 5% na presença da carga fixa. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta tanto a forma de onda tensão de linha como a forma de onda da corrente para o nível de carregamento. O resultado encontrado demonstra que novamente não houve alterações relevantes no sinal de tensão quando comparada a sem a carga fixa, e a forma da onda de tensão segue semelhante ao encontrado para o carregamento de 50% com nova a carga. No caso da forma de onda da corrente fornecida pela rede ,apresenta um nível de distorção baixo tendo comportamento semelhante ao caso de carregamento em 50% com carga a distribuição harmônica de tanto da tensão como da corrente de linhas são apresentadas na Figura 45.

Figura 45 - Comportamento da rede para SOC 5% com carga fixa.

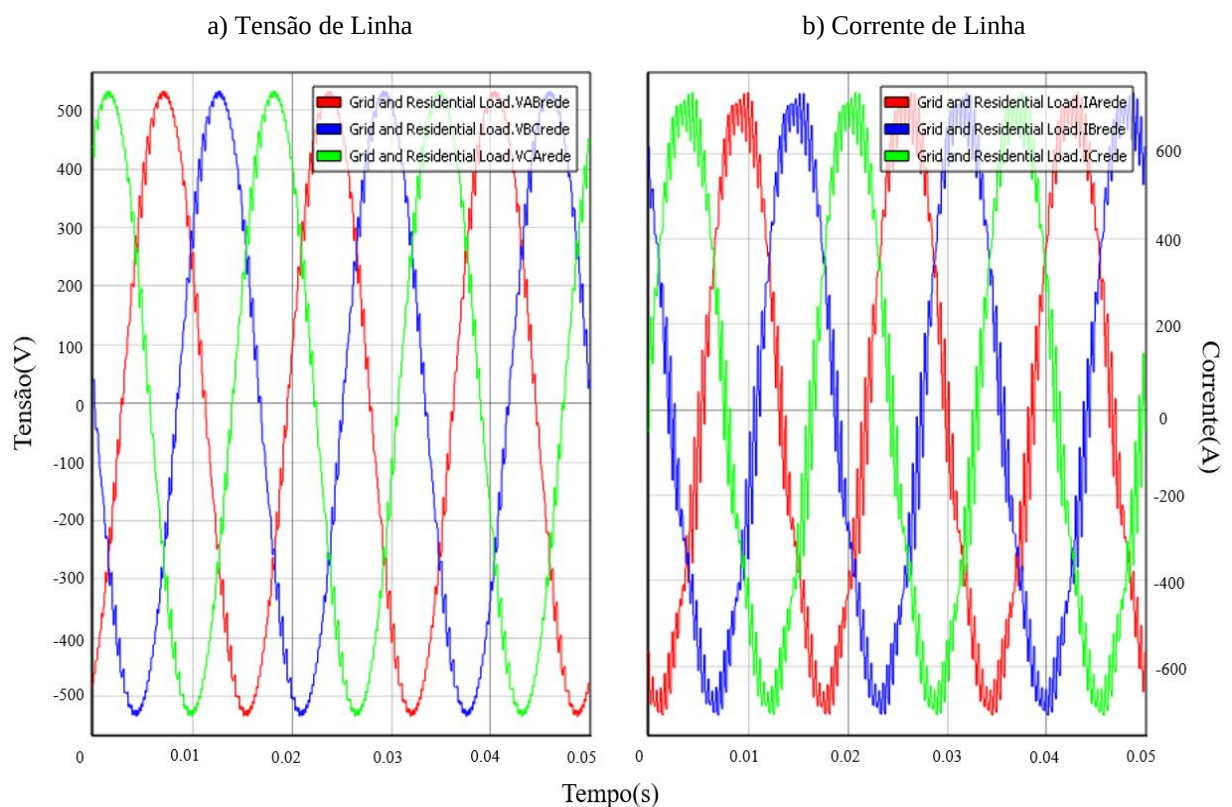
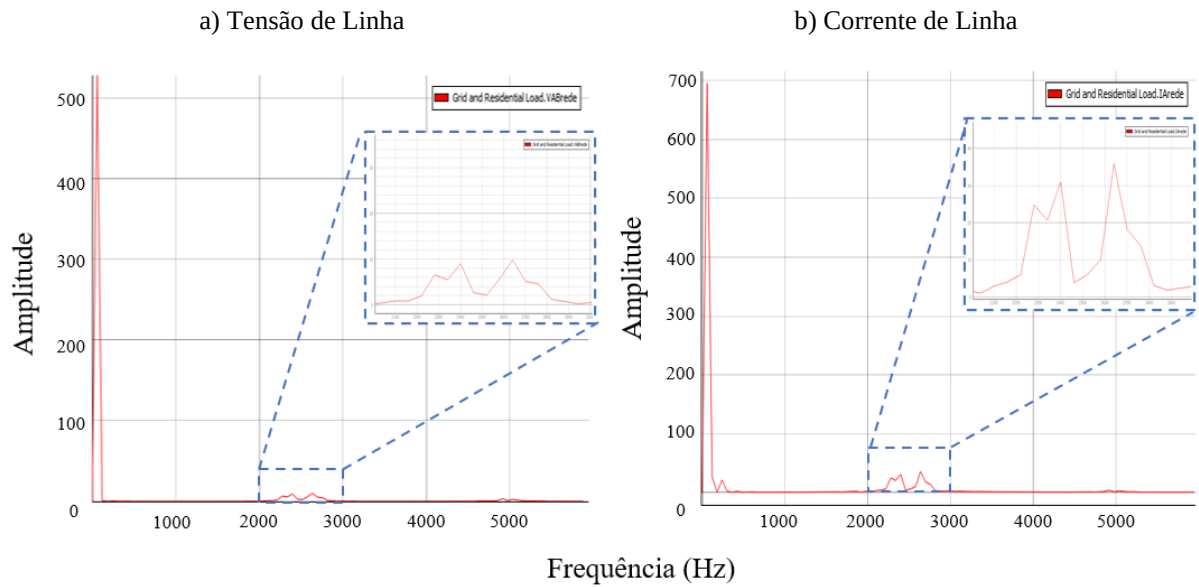
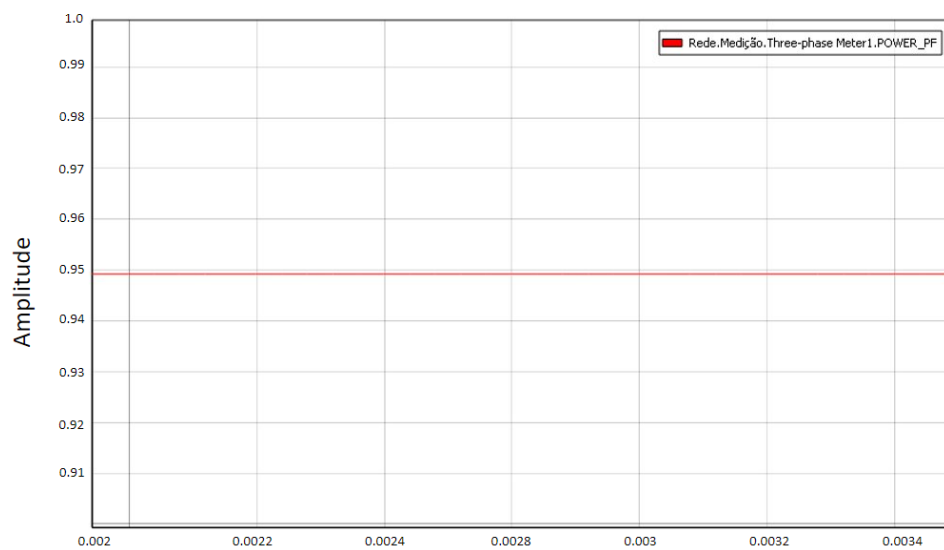


Figura 46 - Distribuição Harmônica para SOC 5% com carga fixa.



A Figura 47 apresenta o comportamento do fator de potência para o SOC de 5% com carga. O fator de potência apresenta o valor médio de 0.948, sendo semelhante ao que a medição para o carregamento a 50% com carga.

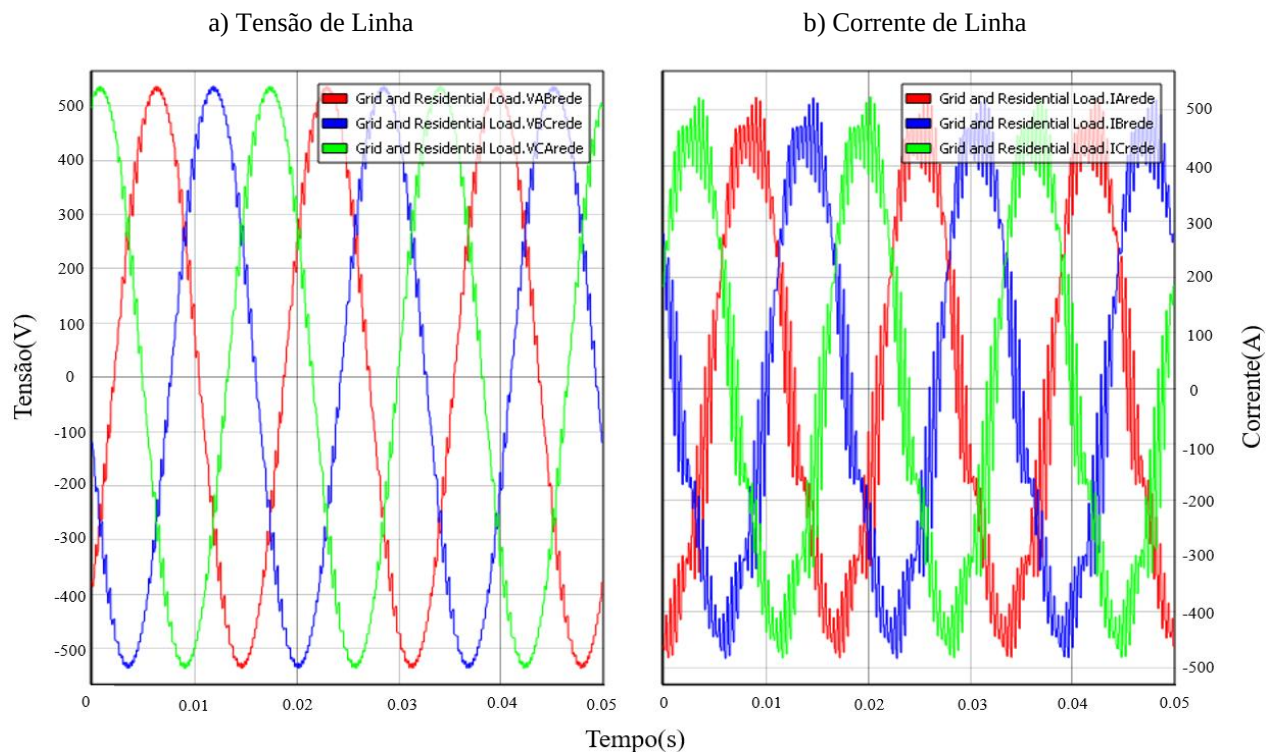
Figura 47 - Fator de Potência na rede para SOC 5%.



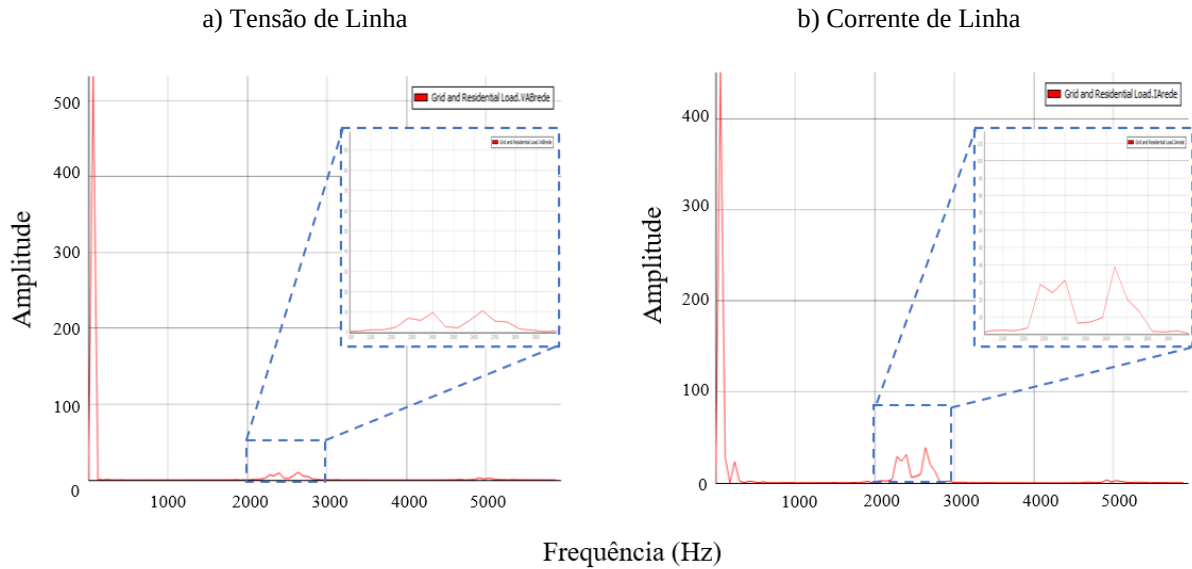
4.7.3 Carregamento em 95% do VE com carga Fixa

O último cenário selecionado consiste na opção de 95% de SOC com a carga fixa, A figura Figura 48 apresenta tanto a tensão de linha como a corrente de linha para este nível de SOC, observa-se que semelhantes a todos os outros casos apresentados a distorção harmônica se encontra dentro do esperado. No caso da corrente de rede para o carregamento de 95% com carga, é notável que quando comparada as outras opções de carga há uma redução real no valor de corrente reduzindo o valor de pico de 700 para 400, pois a corrente fornecida está praticamente sendo direcionada ao atendimento da carga fixa como também que o comportamento da corrente quando compara a opção sem carga apresenta um comportamento muito mais próximo de uma senoide.

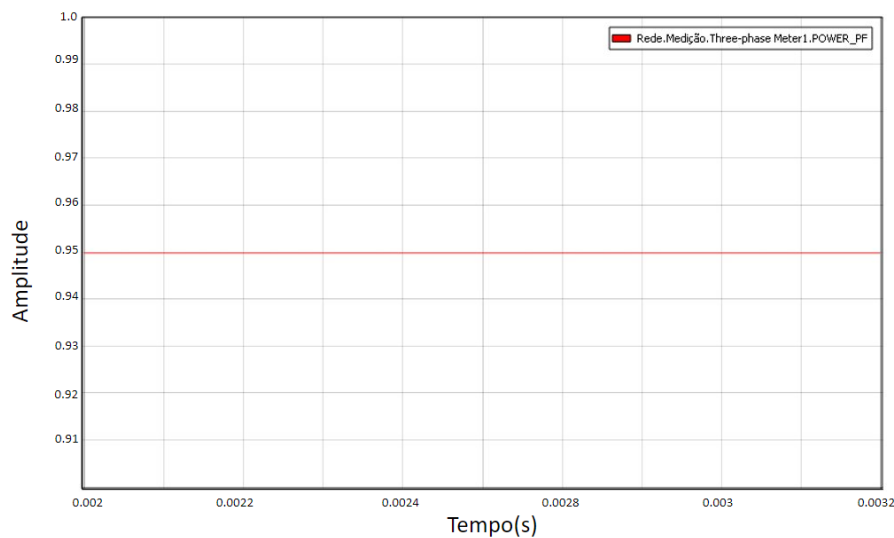
Figura 48 - Comportamento da rede para SOC 95% com carga fixa.



A distribuição de ambos os sinais da Figura 48 são apresentados na Figura 49 conforme esperado não há alterações no comportamento da distribuição harmônica fornecida pela rede, no entanto para a corrente ocorre mudanças significativas onde há uma redução harmônica quando comparada ao caso sem a carga fixa para o SOC de 5%.

Figura 49 - Distribuição Harmônica para SOC 5% com carga fixa.

Por fim, a Figura 50 apresenta o comportamento do fator de potência para este nível de carregamento. Semelhante aos outros pontos de operação com carga avaliados anteriormente, a variação de fator de potência é pequena e pode ser desprezada (está dentro dos limites aceitáveis segundo os critérios normativas para indicadores de qualidade).

Figura 50 - Fator de Potência na rede para SOC 95%

Em resumo, considerando o modelo desenvolvido e as simulações, observou-se baixa distorção harmônica no sinal da forma de onda da tensão nos cenários avaliados. Sendo possível concluir que em condições normais de operação dentro de toda a faixa de carregamento, os indicadores de distorção devem ser mantidos e não são esperadas violações. Argumento semelhantes para os sinais de frequência elétrica. Por outro lado, podem surgir pontos de

atenção relacionados a distorções na forma de onda dos sinais de corrente elétrica, bem como pontos de operação com baixo fator de potência sem a carga próxima instala, para o caso da carga todas as simulações constam que os valores de fator de potência e de componentes harmônicas na carga apresentam resultados dentro dos limites dos indicadores de qualidade da energia mencionados associados ao Módulo 8 do PRODIST.

5. INDICADOR DE IMPACTOS ELÉTRICOS

Com o aumento da adoção de veículos elétricos, surge a necessidade de compreender e gerenciar os impactos dos carregamentos na rede elétrica. O aumento da demanda por energia elétrica decorrente do carregamento dos veículos pode sobrecarregar a infraestrutura existente, impactando em fenômenos de qualidade da energia, como descrito e simulados nos capítulos anteriores deste trabalho.

Um indicador de qualidade da energia específico para o impacto na rede de carregamento de veículos elétricos desempenha um papel fundamental na mitigação dos problemas relacionados a presença da nova carga. O indicador pode fornecer informações preditivas para o planejamento da rede elétrica considerando a evolução de perfil do carregamento de VEs, permitindo que as concessionárias de energia identifiquem e mitiguem indicadores de qualidade da energia de forma antecipada.

Após a análise dos fenômenos de qualidade no contexto da recarga de veículos elétricos, um novo indicador foi desenvolvido específico para carregamento de veículos elétricos. Os parâmetros cruciais, conforme observados tanto na literatura quanto na simulação, são:

- Flutuações de tensão
- Distorção harmônica
- Fator de potência
- Potência do carregador
- Potência de curto-circuito

Com em um levantamento baseados nas referências e trabalhos consultados, foi desenvolvida uma tabela para avaliar quais fenômenos de qualidade tem sido em análises referente ao impacto elétrico na qualidade da energia durante o processo de carregamento dos veículos elétricos.

Tabela 9 - Pontos de Relevância do impacto elétrico da recarga de VEs.

Artigos	Estabilidade	Harmônicos	Flutuação de tensão	Perdas	Fator de Potência	Confiabilidade	Desbalanço
(Deb <i>et al.</i> , 2018)	x			x		x	

Artigos	Estabilidade	Harmônicos	Flutuação de tensão	Perdas	Fator de Potência	Confiabilidade	Desbalanço
(Ahmadi <i>et al.</i> , 2019)		x	x	x	x		x
(Farhoodnea <i>et al.</i> , 2013)	x	x	x		x		
(Nour <i>et al.</i> , 2020)		x	x	x		x	
(Khalid <i>et al.</i> , 2019)	x	x	x	x	x	x	x

5.1 Avaliação dos Impactos Elétricos

Nos resultados informados na simulação foram abordados principalmente os indicadores de qualidade da energia motivados pelo histórico de aplicação, as flutuações de tensão, a distorção harmônica e o fator de potência.

No entanto outros dois parâmetros requer uma real atenção, são eles a potência do carregador instalado como também a potência de curto circuito no ponto destinado a instalação.

A capacidade de curto-circuito de um barramento é uma medida importante para avaliar a resposta do sistema elétrico em caso de falta, sendo definida como o produto da magnitude da corrente total de falta trifásica pela tensão pré-falta do barramento e é comumente expressa em MVA.

Durante uma falta em um barramento, a tensão é reduzida a praticamente zero, afetando também a tensão nas demais barras do sistema, que sofrem oscilações durante a ocorrência da falta. É fundamental entender a robustez, também conhecida como inércia elétrica, de um sistema, pois ela indica a severidade do estresse causado pela falta. A capacidade de curto-circuito, ou nível de curto-circuito, é uma grandeza utilizada na análise. A força ou inércia de um barramento refere-se à sua capacidade de manter o nível de tensão, e está diretamente relacionada à capacidade de curto-circuito do barramento.

Assim, quanto maior for a PCC (Potência de Curto-Circuito) de um barramento, maior será sua capacidade de manter o nível de tensão em condições de falta e novas cargas. Diversos fatores influenciam a PCC ao longo do sistema, incluindo as impedâncias dos principais

transformadores, os esquemas de conexões dos barramentos e as impedâncias das linhas de transmissão.

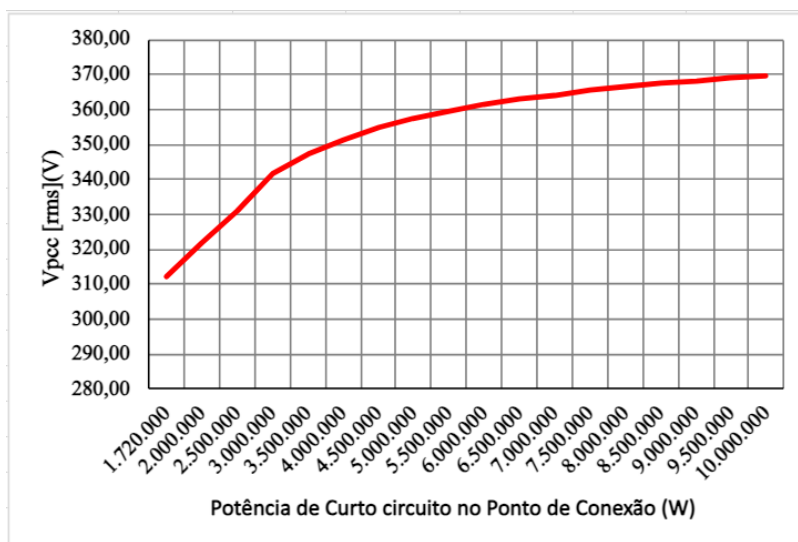
Para determinar a magnitude da corrente de curto-circuito em um barramento, é necessário considerar todas as possíveis fontes de energia ao longo da rede, bem como suas reatâncias, que podem alimentar a falta.

É importante destacar que uma adequada avaliação e dimensionamento da capacidade de curto-circuito dos barramentos e do sistema como um todo contribui para a segurança e confiabilidade do fornecimento de energia elétrica, garantindo a proteção adequada dos equipamentos e a operação estável do sistema elétrico de potência.

É importante considerar que a introdução de uma nova carga no sistema elétrico pode causar variações no afundamento de tensão, dependendo da potência de curto-circuito existente. Quando uma carga é conectada ao sistema, ocorre um fluxo adicional de corrente que pode afetar a estabilidade da tensão, especialmente durante condições de falta.

Se a potência de curto-circuito do sistema for alta, ou seja, se a capacidade de curto-circuito for adequada em relação à potência da nova carga, o impacto no afundamento de tensão pode ser mínimo. No entanto, se a potência de curto-circuito for baixa em comparação com a potência da nova carga, é mais provável que ocorra uma queda significativa na tensão.

Portanto, ao projetar a implantação de uma nova carga em um sistema elétrico, é essencial considerar a capacidade de curto-circuito existente e avaliar seu impacto na estabilidade da tensão, a fim de garantir um fornecimento confiável e estável de energia elétrica. A partir destes seguimentos foi realizado na simulação um estudo para analisar o comportamento do afundamento de tensão na rede com a variação da potência de curto circuito, conforme apresentado na Figura 51. A PCC foi iniciada no valor de 1,72e6 MVA (valor mínimo que viabilizou a simulação por limitação do software utilizada na simulação), em seguida foi realizada a variação com um adicional de 500 kW na potência de curto-circuito.

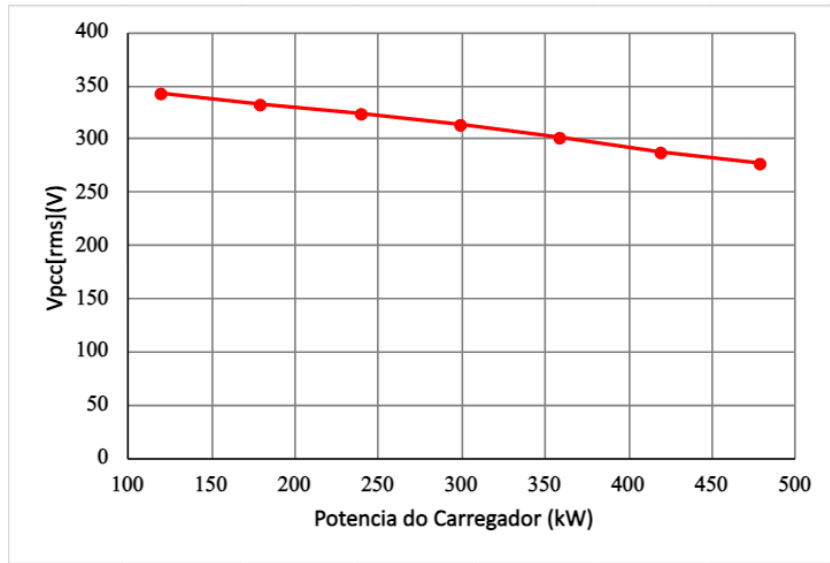
Figura 51 - $V_{pcc}[rms]$ x SCC.

Os resultados apresentados na Figura 51 foram direcionados a observar que quanto menor a potência de curto-circuito maior a queda de tensão durante o carregamento, demonstrando que o parâmetro de potência de curto circuito tem relevância nos aspectos do impacto da rede com a utilização de carregamento de um veículo elétrico.

O outro ponto importante a ser analisado consiste no aumento da potência dos carregadores, pois este aumento gera uma demanda adicional de energia ao sistema elétrico. Aumentar a potência dos carregadores significa fornecer uma recarga mais rápida para os veículos elétricos, reduzindo o tempo necessário para carregar as baterias. No entanto, a carga rápida também implica em uma demanda maior no curto período de tempo em que os veículos estão conectados.

O aumento da potência pode levar a picos de demanda, podendo afetar a estabilidade da rede elétrica e gerar afundamentos de tensão na rede aumentando o risco de interrupções no fornecimento de energia. Para diminuir os impactos, podem ser implementadas estratégias de gerenciamento de carga, como o carregamento inteligente, que distribui a demanda de energia ao longo do tempo e evita sobrecargas repentinas na rede.

Em simulação foi implementado um estudo para verificar o impacto na rede, visto como um afundamento de tensão no período de carregamento do VE. A Figura 52 demonstra o comportamento da tensão no ponto de conexão da rede, variando a potência do carregador em 60kW por etapa.

Figura 52 - $V_{pcc}[rms]$ x Potência do Carregador.

Conforme apresentado na figura, a potência do carregador impacta diretamente no comportamento de tensão da rede levando a sua importância como um parâmetro na proposição de um indicador de impacto elétrico para carregamento de veículo elétrico.

5.2 Proposta de indicador de Impactos Elétricos

Utilizando as informações obtidas em simulação e com a verificação das motivações para definição de cada parâmetro a ser utilizado, foi desenvolvido um novo indicador para a verificação do impacto elétrico causado durante o carregamento de um veículo elétrico denominado *EV charging Grid Impact Indice* (ECGII). As Equações 34 e 35 definem o novo índice:

$$ECGII = f(THD_v, THD_i, Scc_{PCC}, P_{CS}, \min(\cos \phi_{CS})) \quad (33)$$

$$ECGII = \frac{P_{CS}}{Scc_{PCC}} \times \{THD_v + THD_i + [1 - \min(\cos \phi_{CS})]\} \quad (34)$$

Onde P_{CS} é a potência nominal do conversor CC/CA das estações de recarga; Scc_{PCC} é a potência de curto-circuito no ponto de conexão; $\cos \phi_{CS}$ é o fator de potência da estação de recarga e $\min(\cos \phi_{CS})$ é o menor valor nominal do fator de potência na condição operativa crítica; THD_v é a distorção de tensão no ponto de conexão e THD_i é a distorção de corrente no ponto de conexão.

Com a definição do indicador, novas simulações foram executadas com o objetivo de verificar o comportamento deste indicador para cada uma das variáveis apresentadas. O estado inicial considerado foi de $S_{CC_{PCC}} = 1.720.000 \text{ W}$, $P_{CS} = 120 \text{ kW}$, $\cos \phi_{CS} = 0,95$, $THD_v = 0,05$, $THD_i = 0,05$ este sendo um estado de operação normal dentro dos critérios de limite estabelecidos na norma PRODIST para acoplamento a rede.

Inicialmente foi verificado o comportamento do índice sobre a variação do Scc de $1.720.000 \text{ W}$ até $10.000.000 \text{ W}$ - atingindo o resultado conforme Figura 53. É possível observar que amplitude do ECGII apresenta uma redução com o aumento da potência de curto-circuito, evidenciando uma resposta adequada para um indicador de impactos elétricos.

Figura 53 - ECGII ($S_{CC_{PCC}}$).

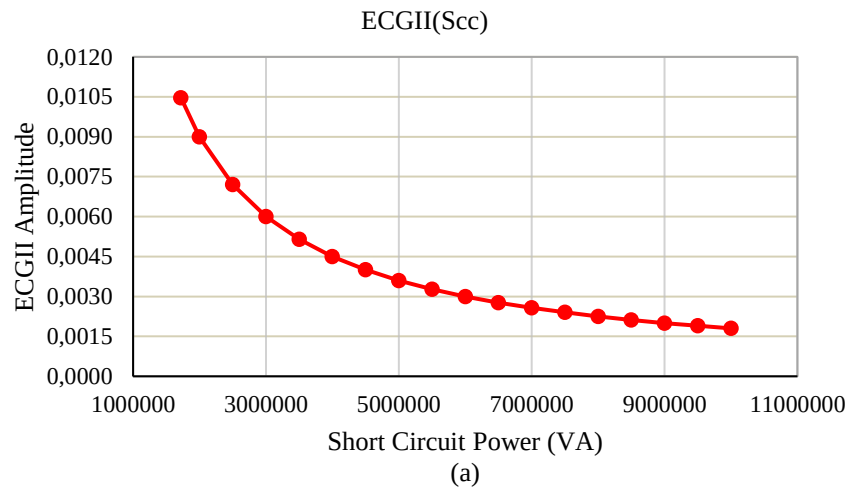
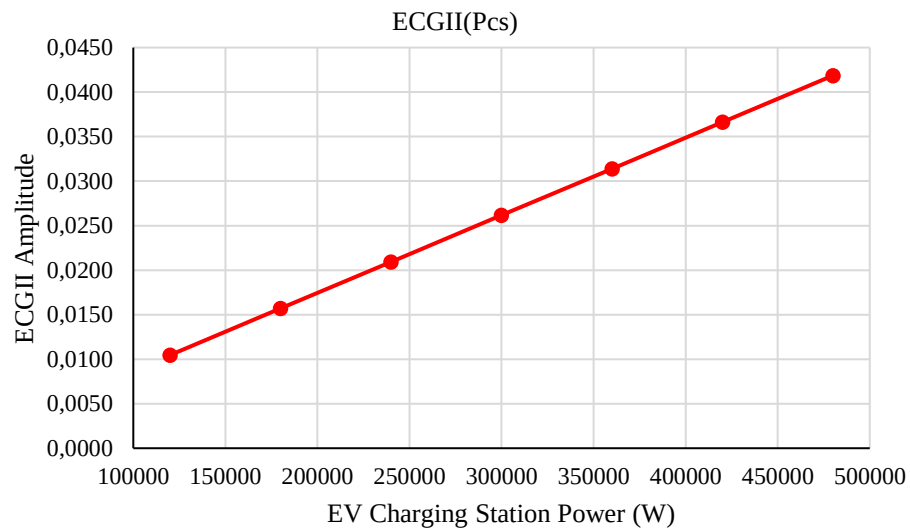


Figura 54 - ECGII (P_{CS}).



Em seguida foi verificado o comportamento sobre o aspecto da potência nominal das estações de recarga, obtendo como resultado a Figura 54. O resultado descrito na Figura 54 demonstra que quanto maior a potência do carregador associado, maior será o valor do ECGII representando o aumento no impacto a rede do ponto de vista do carregador. A Figura 55 e Figura 56 demonstram o comportamento referente ao THD_v e THD_i respectivamente.

Figura 55 - ECGII (THD_v).

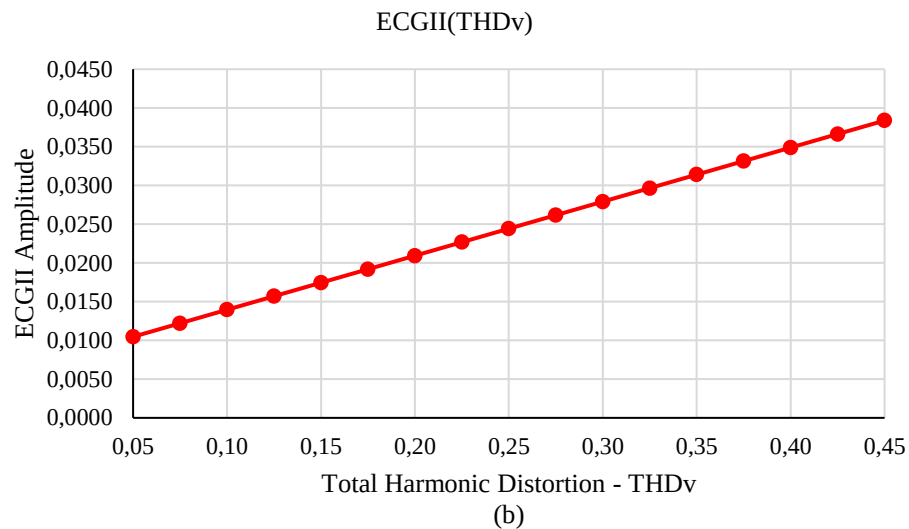
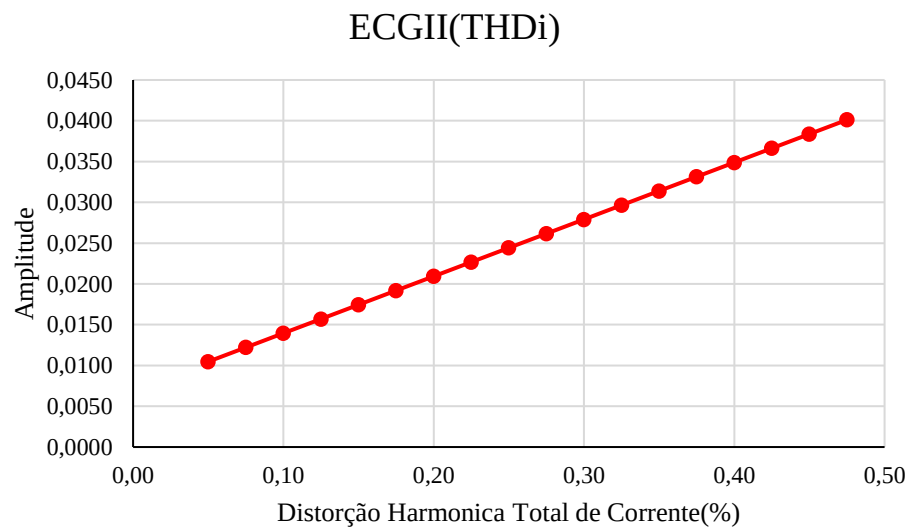


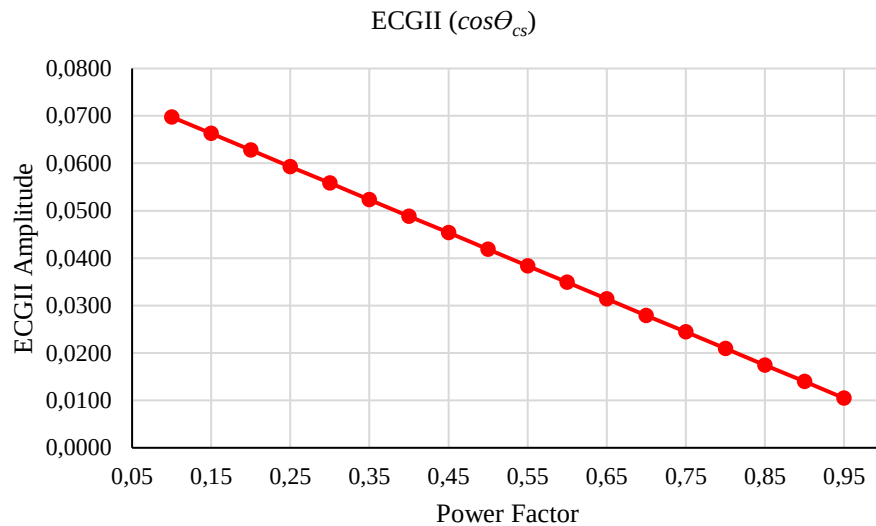
Figura 56 - ECGII (THD_i).



A Distorção harmônica Total de corrente e de tensão apresenta o mesmo estímulo ao indicador: o ECGII tende a aumentar quanto maior for o fator harmônico aplicado a rede tanto

de tensão como de corrente. O último parâmetro a ser verificado para o comportamento do indicado é o fator de potência apresentado na Figura 57

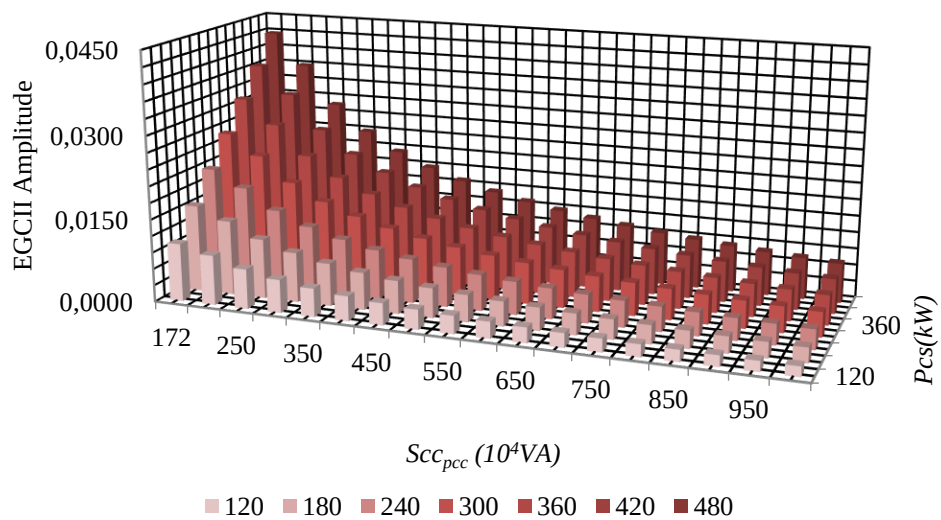
Figura 57 - ECGII ($\cos \phi_{CS}$).



Onde quanto menor for o fator de potência associado a rede, maior o impacto elétrico causado a rede.

Outra percepção do comportamento deste indicador pode ser observada com a variação de dois parâmetros ocorrendo de maneira simultânea, na Figura 58 é apresenta o comportamento da amplitude do sinal com a variação da potência de curto-circuito e da potência nominal no ponto de acoplamento com a rede.

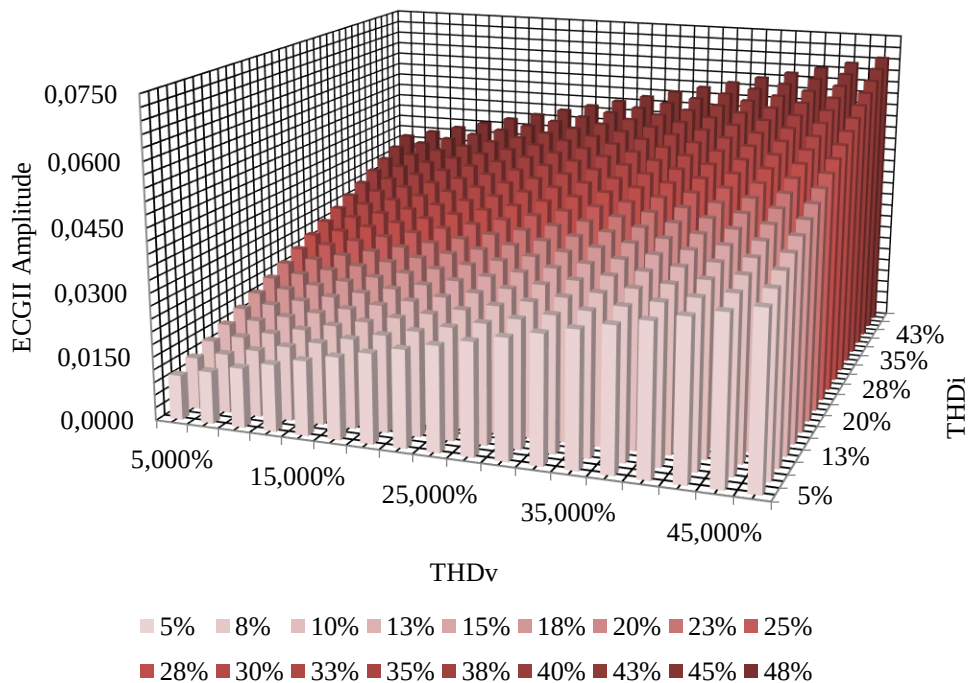
Figura 58 - ECGII ($SCC_{PCC} \times P_{CS}$).



É observado na Figura 58 que quanto menor a potência de curto e maior a potência do carregado reconectado a rede maior é a amplitude do sinal avaliado, então maior o impacto deste equipamento na rede.

No caso do comportamento do indicador para a variação simultânea dos parâmetros de THD de tensão e corrente conforme ilustrada na Figura 59, é observado que quanto menor o efeito harmônico total de ambos os sinais menor o impacto do carregamento no ponto de vista da rede elétrica na qual está conectado.

Figura 59 - ECGII ($THD_v \times THD_i$).



Tendo em vista os parâmetros apresentados foi desenvolvido um processo de classificação deste indicador visando identificar de maneira clara por intermédio do ECGII o impacto de uma nova aplicação de carregamento do veículo elétrico

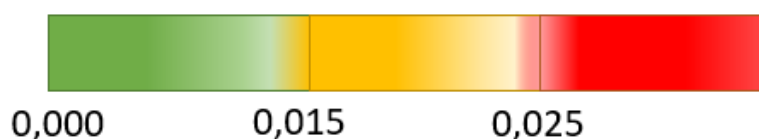
O ECGII foi categorizada em 3 classificações: Adequado, Regular e Crítico:

- Adequado: esta classificação ocorre quando o valor do ECGII encontrasse dentro da faixa de 0,0000 até 0,015, onde representa que o impacto elétrico da implementação do carregador, verificado no ponto de rede a qual se deseja conectar, é baixo sendo possível de maneira simples afirma que do ponto de vista da rede a presença desta nova carga não representa riscos a rede.

- Regular: para o caso da classificação regular o ECGII deve-se encontrar dentro da faixa de 0,015 até 0,025, onde representa que do ponto de vista da rede está aplicação se encontra próximo ao ideal, no entanto algum dos parâmetros de qualidade da energia pode se encontrar fora da norma estabelecida sendo importante a verificação individual de cada parâmetro.
- Crítico: sendo a opção que representa quando a implantação do carregamento no ponto da rede é praticamente inviável, ocorrendo quando o ECGII apresenta valores maiores que 0,025, a inviabilidade ocorre, pois, diversos parâmetros de qualidade da energia apresentam valores maiores que o permitido para sua conexão.

Para facilitar o entendimento e a verificação da classificação do ICGII, a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** representa em escalar de cor estas classificações sendo bom representado pela cor verde, regular amarelo e ruim vermelho.

Figura 60 - Distribuição em espectro de cor do ECGII



O desenvolvimento deste indicador visa contribuir para facilitar a verificação para a concessionário de energia e o consumidor se a implantação de um sistema para recarga de veículo elétrico naquela região é tecnicamente viável.

6. CONCLUSÕES

Em suma, esta dissertação abordou a modelagem de estações de recarga e veículos elétricos, bem como os impactos elétricos resultantes da conexão das estações. Além disso, foram realizadas simulações da operação de um eletroposto e proposto um indicador de impactos elétricos.

No capítulo de Estado da Arte da Modelagem de Estações de Recarga e Veículos Elétricos, foram discutidos os principais aspectos relacionados à modelagem de estações de recarga, assim como a modelagem de veículos elétricos. A revisão de literatura permitiu compreender as principais abordagens e metodologias utilizadas.

Em seguida, no capítulo de Prospecção de Impactos Elétricos da Conexão de Estações de Recarga, foram analisados os impactos elétricos decorrentes da conexão das estações de recarga à rede elétrica. Foram abordadas questões como flutuação de tensão, fator de potência e distorções harmônicas. A análise foi fundamental para compreender os desafios e possíveis soluções relacionadas à integração das estações na rede elétrica.

Posteriormente, foi realizada a simulação da operação do eletroposto no capítulo correspondente. Diferentes cenários de carregamento foram considerados, variando de 5% a 95% de SOC do veículo, também foram adotados cenários com a presença de carga fixa no empreendimento. As simulações permitiram avaliar o desempenho do eletroposto e identificar possíveis problemas de qualidade na rede.

Por fim, no capítulo sobre o Indicador de Impactos Elétricos, foram apresentados outros parâmetros que impactam na rede como simulações dos componentes e foi proposta uma métrica para avaliar os impactos. O novo indicador proposto busca quantificar os efeitos da conexão das estações de recarga na rede elétrica, fornecendo uma medida objetiva para orientar o dimensionamento e a operação das estações.

Em conclusão, esta dissertação contribuiu para a compreensão dos impactos elétricos resultantes da conexão das estações. Como também as simulações realizadas e o indicador proposto fornecem informações para os projetistas e planejadores/operadores do sistema elétrico, auxiliando na tomada de decisão e na busca por soluções eficientes e sustentáveis para a mobilidade elétrica.

6.1 Trabalhos Futuros

Seguem algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Refinamento do indicador de impactos elétricos: Realizar um estudo aprofundado sobre os parâmetros e variáveis que compõem o indicador de impactos elétricos proposto. Explorar diferentes métodos de ponderação e combinação dos parâmetros para melhorar a precisão e representatividade do indicador. Além disso, considerar a inclusão de novos parâmetros relevantes para uma avaliação abrangente dos impactos elétricos.
- Validação experimental do indicador: Realizar um estudo experimental para validar o indicador proposto. Coletar dados reais de estações de recarga em operação e comparar os resultados obtidos com o indicador proposto aos impactos elétricos medidos. A validação experimental ajudaria a avaliar a eficácia e confiabilidade do indicador, bem como identificar possíveis ajustes ou melhorias necessárias.
- Desenvolvimento de indicadores de sustentabilidade: Explorar o desenvolvimento de indicadores de sustentabilidade específicos para estações de recarga de veículos elétricos, considerando fatores ambientais, econômicos e sociais relacionados à operação das estações de recarga, permitindo uma avaliação mais abrangente dos impactos da mobilidade elétrica, além dos aspectos puramente elétricos.
- Implementação do indicador em ferramentas de gestão de estações de recarga: Integrar o indicador proposto em ferramentas de gestão de estações de recarga existentes ou desenvolver novas ferramentas que incorporem o indicador, levando aos operadores de estações de recarga monitorar e avaliar continuamente os impactos elétricos de suas operações, facilitando a tomada de decisões informadas para melhorar a eficiência e minimizar os efeitos negativos na rede elétrica.

6.2 Produção Científica

Os seguintes trabalhos foram publicados durante a elaboração desta dissertação:

- S. D. Vanconcelos, José F.C. Castro, Leonardo LIMONGI; Gustavo M.S. AZEVEDO, “Operation of EV charging station with a photovoltaic system to reduce the impact on the distribution grid” 27th International Conference on Electricity Distribution Rome, 12-15 June 2023.
- Samuel D. Vasconcelos; José F.C Castro; Leonardo R. Limongi; Amanda L. Fernandes; et all, “Avaliação da operação de Eletroposto de Recarga Rápida e Simulação dos Impactos Elétricos Da Conexão”, XXVII SNPTEE, 26 a 29 de novembro, Brasília, 2023. Este trabalho recebeu uma premiação de menção honrosa no NGN do SNPTEE.
- S.V Dias, et all. “Assessment of EV charging grid impact and quality indice proposal, 2024 (to be submitted).

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMADI, Abdollah *et al.* Power quality improvement in smart grids using electric vehicles: A review. **IET Electrical Systems in Transportation**, [s. l.], v. 9, n. 2, p. 53–64, 2019.

ALSHAREEF, Sami M.; MORSI, Walid G. Impact of fast charging stations on the voltage flicker in the electric power distribution systems. **2017 IEEE Electrical Power and Energy Conference, EPEC 2017**, [s. l.], v. 2017-Octob, p. 1–6, 2018.

ANEEL. PRODIST MÓDULO 8 – Qualidade do fornecimento de energia elétrica. [s. l.], v. 15, n. 2, p. 1, 2021.

BARSALI, Stefano *et al.* Storage applications for Smartgrids. **Electric Power Systems Research**, [s. l.], v. 120, p. 109–117, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2014.07.029>.

BRADLEY, W G. Electric Vehicle Battery Charger power Line Interface. [s. l.], p. 430–434, 1981.

BUTLER, Karen L.; EHSANI, Mehrdad; KAMATH, Preyas. A matlab-based modeling and simulation package for electric and hybrid electric vehicle design. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, [s. l.], v. 48, n. 6, p. 1770–1778, 1999.

COSTA, Tatiane S. *et al.* Technical study of hybrid PV/BESS system for charging station of the Electric Mobility Laboratory of the University of Campinas. **2021 14th IEEE International Conference on Industry Applications, INDUSCON 2021 - Proceedings**, [s. l.], p. 1274–1281, 2021.

DEB, Sanchari *et al.* Impact of electric vehicle charging station load on distribution network. **Energies**, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 1–25, 2018.

DI PAOLO, Marcelo. Analysis of harmonic impact of electric vehicle charging on the electric power grid, based on smart grid regional demonstration project - Los angeles. **2017 IEEE Green Energy and Smart Systems Conference, IGESSC 2017**, [s. l.], v. 2017-Novem, p. 1–5, 2018.

EGAN, Michael G. *et al.* Power-factor-corrected single-stage inductive charger for electric

vehicle batteries. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, [s. l.], v. 54, n. 2, p. 1217–1226, 2007.

FARHOODNEA, Masoud *et al.* Power Quality Impact of Renewable Energy based Generators and Electric Vehicles on Distribution Systems. **Procedia Technology**, [s. l.], v. 11, n. Iceei, p. 11–17, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.156>.

HABIB, Salman *et al.* Contemporary trends in power electronics converters for charging solutions of electric vehicles. **CSEE Journal of Power and Energy Systems**, [s. l.], v. 6, n. 4, p. 911–929, 2020.

IDAHO NATIONAL LABORATORY. DC Fast Charger Fact Sheet: ABB Terra 53 CJ charging a 2015 Nissan Leaf. [s. l.], p. 1–5, 2016. Disponível em: <https://avt.inl.gov/vehicle-make/nissan>.

KAZI, Monzure Khoda *et al.* Green hydrogen for industrial sector decarbonization: Costs and impacts on hydrogen economy in qatar. **Computers and Chemical Engineering**, [s. l.], v. 145, p. 107144, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.107144>.

KHALID, Mohd Rizwan *et al.* A Comprehensive review on electric vehicles charging infrastructures and their impacts on power-quality of the utility grid. **eTransportation**, [s. l.], v. 1, p. 100006, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2019.100006>.

KHALIGH, Alireza; DUSMEZ, Serkan. Comprehensive topological analysis of conductive and inductive charging solutions for plug-in electric vehicles. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, [s. l.], v. 61, n. 8, p. 3475–3489, 2012.

KHAN, Wajahat *et al.* A Comprehensive Review of Fast Charging Infrastructure for Electric Vehicles. **Smart Science**, [s. l.], v. 6, n. 3, p. 256–270, 2018. Disponível em: <http://doi.org/10.1080/23080477.2018.1437323>.

KLONTZL, K W; DIVAN. Converter Selection for Electric Vehicle Charger. [s. l.],

LAFUENTE, Cezar Orellana. Carregador de Baterias Monofásico para aplicação em Veículos Elétricos. [s. l.], 2011.

MASSERANT, B. J.; STUART, T. A. A maximum power transfer battery charger for electric vehicles. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, [s. l.], v. 33, n. 3, p.

930–938, 1997.

MESBAHI, Tedjani *et al.* Dynamical modeling of Li-ion batteries for electric vehicle applications based on hybrid Particle Swarm-Nelder-Mead (PSO-NM) optimization algorithm. **Electric Power Systems Research**, [s. l.], v. 131, p. 195–204, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2015.10.018>.

MOHD, T. A.T.; HASSAN, M. K.; AZIZ, W. M.K.A. Mathematical modeling and simulation of an electric vehicle. **Journal of Mechanical Engineering and Sciences**, [s. l.], v. 8, n. June, p. 1312–1321, 2015.

NOUR, Morsy *et al.* Review of Positive and Negative Impacts of Electric Vehicles Charging on Electric Power Systems. **Energies**, [s. l.], v. 13, n. 18, 2020.

SCHALTZ, Erik. Electrical Vehicle Design and Modeling. **Electric Vehicles - Modelling and Simulations**, [s. l.], 2011.

SUBJAK, Joseph S.; MCQUILKIN, John S. Harmonies—Causes, Effects, Measurements, and Analysis: An Update. **IEEE Transactions on Industry Applications**, [s. l.], v. 26, n. 6, p. 1034–1042, 1990.

THIRINGER, Torbjörn; HAGHBIN, Saeid. Power quality issues of a battery fast charging station for a fully-electric public transport system in gothenburg city. **Batteries**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 22–33, 2015.

TORQUATO, Ricardo *et al.* Modelo Probabilístico para Análise dos Impactos da Recarga de Veículos Elétricos em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. **Citenel IX**, [s. l.], 2017.

TYPHOON HIL. **Electric vehicle**. [S. l.], 2023. Disponível em: https://www.typhoon-hil.com/documentation/typhoon-hil-application-notes/References/electric_vehicle.html. Acesso em: 3 jun. 2023.

WAGER, Guido; WHALE, Jonathan; BRAUNL, Thomas. Driving electric vehicles at highway speeds: The effect of higher driving speeds on energy consumption and driving range for electric vehicles in Australia. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 63, p. 158–165, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.060>.

WANG, Lu *et al.* Grid Impact of Electric Vehicle Fast Charging Stations: Trends, Standards,

Issues and Mitigation Measures - An Overview. **IEEE Open Journal of Power Electronics**, [s. l.], v. 2, n. February, p. 56–74, 2021.