



Universidade Federal do Pará – UFPA
Instituto de Tecnologia – ITEC
Faculdade de Engenharia Elétrica e Biomédica

GABRIEL ARAUJO DA SILVA

Avaliação da arquitetura V2G de veículos elétricos em redes de distribuição de energia elétrica

Belém
2025

GABRIEL ARAUJO DA SILVA

Avaliação da arquitetura V2G de veículos elétricos em redes de distribuição de energia elétrica

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora da Faculdade de Engenharia Elétrica e Biomédica da Universidade Federal do Pará do Instituto de tecnologia, para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Thiago Mota Soares.

Belém
2025

GABRIEL ARAUJO DA SILVA

Avaliação da arquitetura V2G de veículos elétricos em redes de distribuição de energia elétrica

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora da Faculdade de Engenharia Elétrica e Biomédica da Universidade Federal do Pará do Instituto de tecnologia, para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Thiago Mota Soares.

Data de aprovação: ____/____/____

Conceito: _____

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Thiago Mota Soares
(Orientador – UFPA/CEAMAZON)

Prof. Dr. Allan Rodrigo Arrifano Manito
(Avaliador – UFPA/CEAMAZON)

Eng. Dr. Carlos Eduardo Moreira Rodrigues
(Avaliador – UFPA/CEAMAZON)

Belém

2025

RESUMO

Atualmente, nota-se um constante crescimento do mercado de carros elétricos e híbridos no mundo, por causa dos diversos benefícios que eles apresentam. Dentre essas vantagens, destacam-se: o maior desempenho em relação à eficiência aos carros convencionais; a não ocorrência de emissões de CO₂, as quais contribuem para poluição atmosférica; e a diminuição da poluição sonora, ocasionada pelos motores a combustão. Além disso, há poucos anos surgiram pesquisas e estudos sobre a tecnologia *Vehicle-to-grid* (Veículo para a rede, V2G), os quais objetivam auxiliar a infraestrutura de distribuição de energia elétrica devido à crescente quantidade de carros elétricos no planeta. Nesse contexto, são realizadas simulações no *OpenDSS*, utilizando parâmetros de equipamentos reais, a fim de obter resultados que reflitam condições operacionais próximas da realidade e, assim, avaliar os impactos do V2G na rede de distribuição de energia elétrica. Os resultados demonstram que o V2G pode ser uma ferramenta eficaz para o gerenciamento da demanda e a melhoria da estabilidade do sistema elétrico, contribuindo para evitar prejuízos à rede e maximizando a eficiência da geração de energia.

Palavras-Chaves: Vehicle-to-grid (V2G). Veículos elétricos. rede de distribuição. OpenDss. Armazenamento de energia.

ABSTRACT

Currently, the market for electric and hybrid cars is constantly growing around the world because of the many benefits they offer. Among these advantages are: better performance in relation to the efficiency of conventional cars; the absence of CO₂ emissions, which contribute to atmospheric pollution; and the reduction of noise pollution caused by combustion engines. In addition, research and studies into Vehicle-to-grid (V2G) technology have emerged in recent years, which aim to help the electricity distribution infrastructure due to the growing number of electric cars on the planet. In this context, simulations are made in *OpenDSS*, using parameters from real equipment, in order to obtain results that reflect operational conditions close to reality and, thus, assess the impacts of V2G on the electric power distribution network. The results show that V2G can be an effective tool for managing demand and improving the stability of the electricity system, helping to avoid damage to the grid and maximizing the efficiency of energy generation.

Keywords: Vehicle-to-Grid (V2G). Electric vehicles. Distribution network. OpenDSS. Energy storage.

Sumário

| | | |
|--------|--|----|
| 1. | INTRODUÇÃO | 8 |
| 1.1. | Contextualização do problema | 8 |
| 1.2. | Objetivo do trabalho | 9 |
| 1.3. | Estrutura do trabalho | 9 |
| 2. | VEÍCULOS ELÉTRICOS | 11 |
| 2.0. | Introdução | 11 |
| 2.1. | Crescimento do mercado | 11 |
| 2.2. | Tipos de veículos elétricos | 12 |
| 2.3. | Tipos de carregamentos | 14 |
| 2.4. | Modelos de estações V2G | 17 |
| 2.5. | Conectores para carregamento de veículos elétricos | 18 |
| 2.6. | Baterias de veículos elétricos | 19 |
| 2.7. | G2V (<i>grid-to-vehicle</i>) | 21 |
| 2.8. | V2G (<i>vehicle-to-grid</i>) | 21 |
| 2.9. | Modelagem de veículo elétrico | 23 |
| 2.9.1. | Comportamento da arquitetura V2G carregando | 25 |
| 2.9.2. | Comportamento da arquitetura V2G descarregando | 25 |
| 2.10. | Conclusão | 26 |
| 3. | METODOLOGIA | 27 |
| 3.0. | Introdução | 27 |
| 3.1. | Fabricante adotado para o veículo elétrico | 28 |
| 3.2. | Modelo adotado para rede de distribuição | 29 |
| 3.2.1. | Modelagem da rede elétrica | 33 |
| 3.3. | Cenários de simulação | 35 |
| 3.4. | Conclusão | 37 |
| 4. | RESULTADOS | 38 |
| 4.0. | Introdução | 38 |
| 4.1. | Teste de curto circuito | 38 |
| 4.2. | Cenário 1 | 40 |
| 4.2.1. | Perdas em momento de descarga e recarga | 47 |
| 4.3. | Cenário 2 | 50 |
| 4.3.1. | Perdas em momento de descarga e recarga | 59 |
| 4.4. | Cenário 3 | 61 |
| 4.5. | Conclusão | 70 |
| 5. | Considerações finais | 72 |

| | |
|------------------------------------|-----------|
| 5.1. Trabalhos Futuros..... | 73 |
| REFERÊNCIAS | 74 |

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização do problema

A matriz energética e elétrica mundial está em constante evolução, porém a maior parte da produção dessa energia elétrica, atualmente, é fundamentada em combustíveis fósseis, como o gás natural, o petróleo, o carvão mineral, entre outros. Essas fontes de energia não renováveis contribuem para o aumento da emissão de gases e, conseqüentemente, para o agravamento do efeito estufa.

Dessa forma, são criados incentivos à utilização de fontes renováveis por meio da implantação de políticas ambientais e de medidas restritivas na produção de energia elétrica não renovável. Nesse contexto, o setor de transporte tem adotado formas inovadoras para otimizar e melhorar a integração dos veículos elétricos com as redes de distribuição de energia. O sistema *Vehicle-to-Grid* (V2G) é uma inovação tecnológica que permite a comunicação bidirecional entre veículos elétricos e a rede elétrica. Essa tecnologia pode prover serviços ancilares e fornecer suporte para rede (KUMAR,2025).

A tecnologia *Vehicle-to-Grid* tem como principal característica o carregamento bidirecional, permitindo não apenas o carregamento da bateria do veículo elétrico, mas também o descarregamento, em que possibilita a injeção de energia elétrica na rede. Essa dinâmica contribui para a estabilização da rede e a integração eficiente de energias limpas, além da possibilidade de oferecer benefícios econômicos aos proprietários dos veículos (KUMAR,2025).

Nesse sentido, é preciso fazer um estudo de caso sobre a inserção desses veículos elétricos equipados com a tecnologia V2G em sistemas de distribuição de energia. Logo, esse trabalho auxilia na modernização dos sistemas de distribuição de energia, pois atualmente ocorre um crescimento acelerado da frota de veículos elétricos. Além disso, é fundamental considerar aspectos como avaliação dos parâmetros de potência, do comportamento

dinâmico do sistema como um todo e da localização geográfica dos pontos de conexão, a fim de assegurar uma integração eficiente.

1.2. Objetivo do trabalho

Esse trabalho tem como objetivo avaliar o impacto causado em redes de distribuição de média tensão no momento em que os veículos elétricos estiverem fornecendo energia por meio da tecnologia V2G. Nesse sentido, serão realizadas simulações no OpenDss, para desenvolver esse estudo de caso e, dessa forma, analisar a aplicação da tecnologia V2G utilizando redes do IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*). Serão analisados parâmetros técnicos, como perfil de tensão, perdas, e potência, para identificar tanto os benefícios quanto os possíveis desafios operacionais.

1.3. Estrutura do trabalho

O trabalho está dividido em cinco capítulos.

No capítulo 1, é apresentada uma introdução ao tema do trabalho, com foco na contextualização do problema do trabalho e na definição dos objetivos do trabalho.

No capítulo 2, é mostrado a evolução do mercado de carros elétricos, abordando a diversidade de modelos disponíveis, os diferentes tipos de sistemas de carregamento, as estações de carregamento, os conectores e as baterias. Esses elementos são fundamentais para compreender a arquitetura V2G, uma vez que compõem a infraestrutura necessária para a integração eficiente entre veículos elétricos e a rede elétrica.

No capítulo 3, é detalhada a metodologia utilizada no desenvolvimento do trabalho, destacando qual modelo de veículo elétrico foi adotado e a rede de distribuição elétrica adotada no software *OpenDSS*. Além disso, são definidos os cenários de simulação, que visam avaliar o impacto da inserção do veículo elétrico no sistema de distribuição.

No capítulo 4, são expostos os resultados das simulações realizadas, acompanhados de análises gráficas e numéricas. Além disso, são discutidos os impactos da inserção das arquiteturas V2G no sistema de distribuição. As

análises buscam demonstrar como essas tecnologias influenciam na eficiência da rede elétrica.

No capítulo 5, é realizada as considerações finais da pesquisa, sintetizando os principais resultados e discutindo a aplicabilidade da tecnologia V2G em cenários reais. Este capítulo também propõe reflexões sobre os desafios e as oportunidades futuras para a implementação dessa tecnologia.

2. VEÍCULOS ELÉTRICOS

2.0. Introdução

Os veículos elétricos ressurgiram para remodelar e evoluir o mercado de automóveis, contribuindo significativamente para um transporte não poluente e mais silencioso, ajudando a reduzir a emissão de gases de efeito estufa. Além disso, o surgimento do V2G permitiu que os veículos elétricos operem de forma bidirecional com a rede.

Nesse sentido, é apresentado nesse trabalho a evolução do mercado de veículos elétricos, os modelos presentes no mercado atualmente, as formas de carregamento de veículos elétricos e os conectores de carregamento disponíveis. Esse conhecimento geral sobre veículos elétricos, auxilia o entendimento sobre a tecnologia V2G.

Os outros tópicos do trabalho abrangem diretamente o funcionamento dessa tecnologia, são eles: os modelos de estações V2G, as baterias dos veículos elétricos e o funcionamento bidirecional (G2V e V2G). Logo, a compreensão desses aspectos é essencial para entender, ao final, a modelagem do veículo elétrico adotada, a qual será utilizada para realizar as simulações.

2.1. Crescimento do mercado

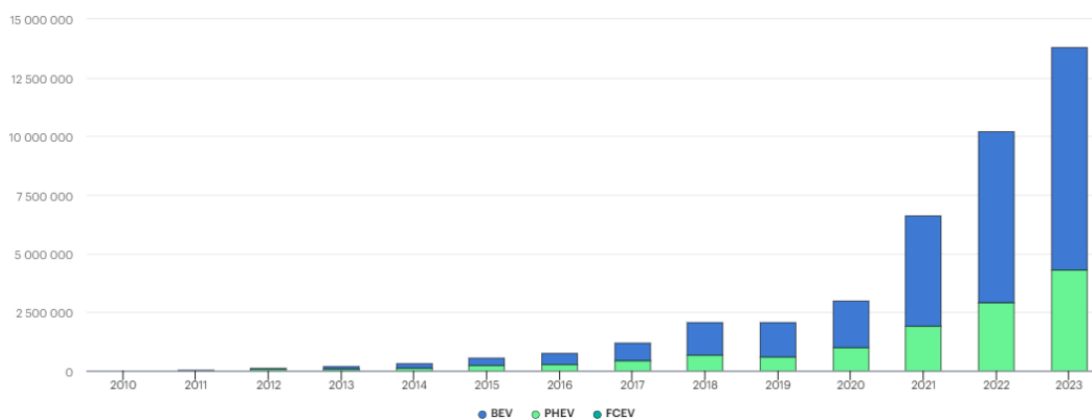
Atualmente, o mercado de veículos elétricos é atrativo pois esse tipo de automóvel proporciona menos poluentes sonoros e possuem uma maior eficiência em comparação aos veículos convencionais (DELGADO et al., 2017). A eficiência dos motores dos veículos elétricos pode alcançar mais de 77%, fazendo com que sejam, significativamente, mais eficientes do que os veículos com motores de combustão interna, cuja eficiência energética varia entre 12% a 30%. (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2020).

Na figura 1, nota-se um aumento expressivo da venda de carros elétricos a cada ano, além disso comparando o ano de 2020 e o ano de 2021, constata-se que a quantidade de vendas, praticamente, dobrou. Ademais, é

possível concluir que a China liderou as vendas e a Europa aumentou 70% em relação ao ano de 2020 (PAOLI, 2022).

Figura 1 – Gráfico das vendas globais de carros elétricos

Vendas veículos elétricos no mundo, 2010-2023



Fonte: IEA, 2024

Existem diversos fatores que influenciaram essa demanda, sendo os principais a elevação do preço do barril de petróleo no ano de 2021, os incentivos fiscais e os subsídios econômicos concedidos por diversos países para quem compra os veículos elétricos e as novas metas de emissões de CO₂ (PAOLI, 2022).

Apesar do crescimento global nas vendas de carros elétricos, países como Brasil, Índia e Indonésia, apresentam uma porcentagem de vendas de carros elétricos, em comparação ao resto do mundo, baixa, abaixo de 1% (PAOLI, 2022).

2.2. Tipos de veículos elétricos

Os veículos elétricos podem ser classificados de acordo com a suas características específicas, o qual podem ser definidos da seguinte forma:

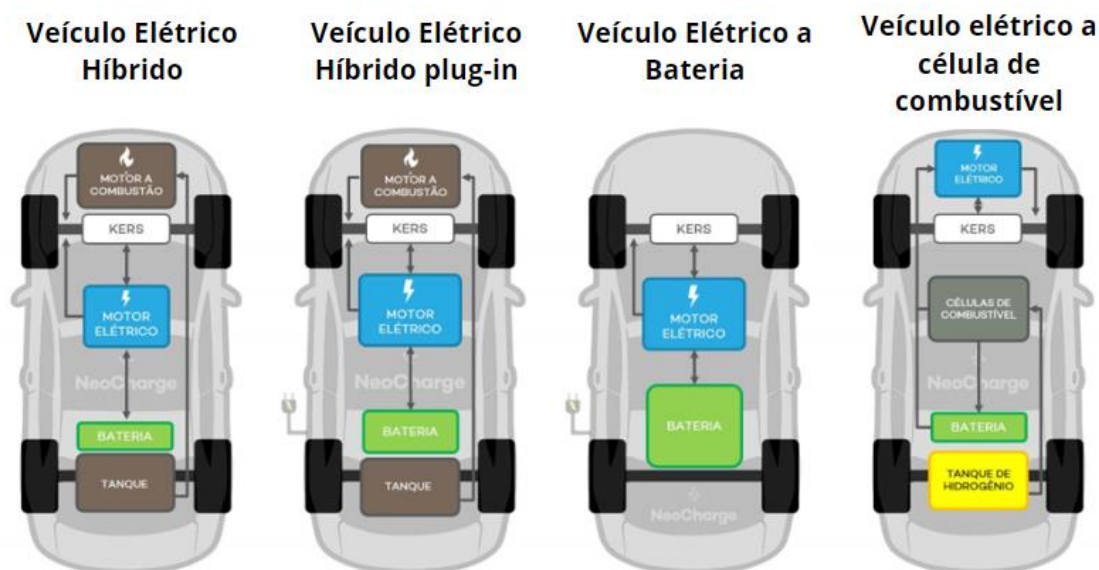
- **Veículo elétrico híbrido (HEV):** automóveis que funcionam com a associação do motor de combustão e o motor elétrico, em que sua fonte principal é diesel ou gasolina, mas sua eficiência é melhor do que carros convencionais com apenas motores de

combustão. Exemplos desse modelo são o Chevrolet Malibu, Toyota Prius e Ford Fusion Hibryd.

- **Veículo elétrico híbrido plug-in (PHEV):** automóveis que funcionam com a associação do motor de combustão com o motor elétrico e uma bateria recarregável. A funcionalidade pode ser totalmente elétrica ou híbrida. Exemplos desse modelo são o Mitsubishi outlander, Volkswagen golf GTE e Volvo V60 PHEV.
- **Veículo elétrico a bateria (BEV):** automóveis que são totalmente elétricos, o qual utilizam a energia armazenada na bateria para alimentar o motor elétrico. Exemplos desse modelo são o Nissan Leaf, Renault Zoe, BMW i3.
- **Veículo elétrico a célula de combustível (FCEV):** automóveis que funcionam com o gás hidrogênio como combustível, em que quando o hidrogênio é combinado com oxigênio resulta na produção de eletricidade, a qual irá alimentar o motor elétrico. Exemplos desse modelo são o Hyundai Nexu e Toyota Mirai.

Na figura 2, mostra-se esses diversos modelos de veículos elétricos que apresentam diferentes funcionalidades em relação ao motor e à bateria. Além disso, a bateria dos BEVs é maior em comparação aos demais, visto que eles utilizam apenas a alimentação da bateria e a tecnologia *KERS* (sistema de recuperação de energia cinética). Como forma de exemplificar, o Nissan Leaf possui uma bateria com capacidade de 40kWh, o qual é significativamente maior quando comparada com a bateria do Ford Fusion Hibryd (capacidade de 7,6 kWh) e a bateria do Mitsubishi outlander (capacidade de 13.8 kWh).

Figura 2 – Modelos de veículos elétricos



Fonte: NeoCharge

2.3. Tipos de carregamentos

Os veículos a combustão são rapidamente abastecidos em postos de combustível, porém o carregamento dos veículos elétricos requer mais tempo, visto que esses carros apresentam diferentes modos de carregamento os quais variam em velocidade de recarga.

Nesse sentido, sabe-se que o tempo de carga de um veículo elétrico plug-in depende de diversos fatores. O fator velocidade de carregamento é limitado pela tecnologia do carro, o qual define a capacidade da bateria de aceitar uma alta taxa de carga, o cabo de carregamento usado e a estação de carregamento (HARDMAN, 2018). O padrão internacional IEC 61851 classifica quatro modos de carregamento diferentes (ENERGISA, 2021).

- **Modo de recarga 1:** essa é a opção mais lenta e simples, em que a ligação do veículo elétrico com a rede elétrica ocorre por meio de uma tomada doméstica comum ou tomada industrial. Devido a isso, esse modo de recarga possui um baixo nível de proteção, pois não emprega um sistema de controle que efetua a comunicação entre o veículo e a rede elétrica. O tempo estimado é de 6 até 8 horas para ter a recarga completa.

Figura 3 – Modo de recarga 1

Fonte: LUGENERGY, 2020

- **Modo de recarga 2:** essa é a opção é apenas utilizada em residências, visto que a ligação do veículo elétrico com a rede elétrica ocorre por meio de uma tomada doméstica comum ou tomada industrial, porém, diferentemente do modo de recarga 1, essa ligação possui um dispositivo conhecido como IC-CPD (*In-Cable Control and Protection Device*), o qual auxilia nas proteções e comunicações necessárias para essa tecnologia. O tempo estimado é de 6 até 8 horas para ter a recarga completa.

Figura 4 – Modo de recarga 2

Fonte: LUGENERGY, 2020

- **Modo de recarga 3:** essa é a opção a qual pode ser encontrada em residências ou, até mesmo, em eletropostos. Nesse caso, a ligação é baseada do veículo elétrico a estação de recarga (conhecidas como *WallBox*, dispositivos que contêm proteções e circuitos de comando e controle necessários), por meio de um cabo desenvolvido em que permite otimizar as condições de recarga e evitar eventuais problemas. O tempo estimado é de 3 até 4 horas para ter a recarga completa.

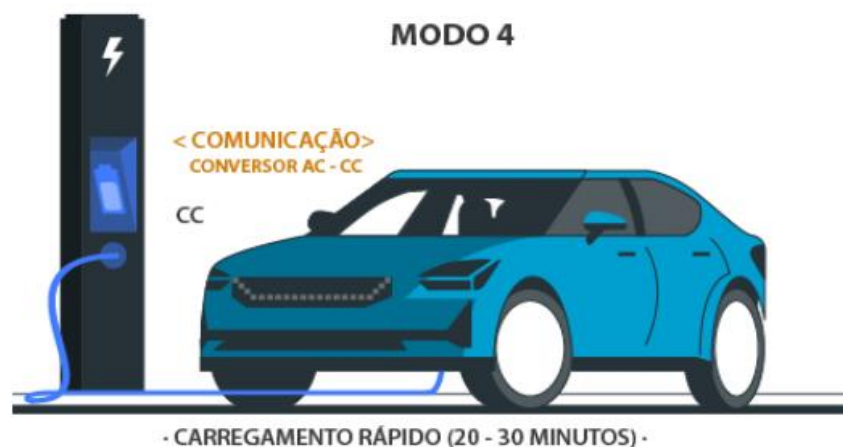
Figura 5 – Modo de recarga 3



Fonte: LUGENERGY, 2020

- **Modo de recarga 4:** essa opção é apenas utilizada em eletropostos. Nesse caso, é utilizado o *WallBox* com uma potência superior ao dos carregadores internos dos veículos, baseada em um carregamento rápido e em corrente contínua. O tempo estimado é de 20 até 30 minutos para ter a recarga completa.

Figura 6 – Modo de recarga 4



Fonte: LUGENERGY, 2020

Tabela 1 – Tipos de carregamentos e suas características (IEC 61851)

| Categorias de Carregamento | Velocidade de Carregamento | Tipo de Alimentação | Tensão (V) | Potência Máxima (kW) | Corrente (A) | Locais de instalação |
|----------------------------|----------------------------|------------------------------|--|----------------------|--------------|---|
| Modo 1 | Carga Lenta | CA - Monofásica ou trifásica | $\leq 250 (1\phi)$ $\leq 480 (3\phi)$ | 3,7 | 16 | Residências |
| Modo 2 | Carga Lenta | CA - Monofásica ou trifásica | $\leq 250 (1\phi)$ $\leq 480 (3\phi)$ | 7,4 | 32 | Residências |
| Modo 3 | Carga Lenta | CA - Monofásica ou trifásica | $\leq 250 (1\phi)$ $\leq 480 (3\phi)$ | 22 | 32 | Residências ou Ponto de Recarga público |
| Modo 4 | Carga Rápida | Corrente Contínua | - | 200 | - | Estação de Recarga Planejada |

Fonte: IEC, 2017

2.4. Modelos de estações V2G

Atualmente, existem diversos modelos de estações de recarga equipadas com a tecnologia V2G, em que possibilitam a conexão bidirecional entre os veículos elétricos e a rede elétrica. Esses modelos variam em termos de capacidade de potência, protocolos de comunicação, interfaces de usuário e funcionalidades adicionais. Outrossim, sabe-se que determinados modelos são projetados para aplicações em residências e pequenas instalações comerciais,

enquanto outros são destinados a grandes frotas de veículos e estabelecimentos de maior porte.

Nesse sentido, é necessário ter conhecimento sobre alguns modelos de estações de carregamento, os quais estão presentes no mercado atualmente. Na figura 7, tem-se como exemplos de estações de recarga com tecnologia bidirecional, o modelo V2G 4.0 e o FE-15, os quais possuem diferentes parâmetros de tensão nominal, potência nominal e tensão de saída, em que são especificados na tabela 2, essas informações são necessárias para realização da simulação no OpenDss.

Figura 7 – Modelos: V2G 4.0 (esquerda) e FE-15 (direita)



Fonte: (MAGNUMCAP, 2020) e (CHADEMO,2022)

Tabela 2 – Parâmetros dos modelos de carregadores bidirecionais: V2G 4.0 e FE-15

| --- | FE-15 | V2G 4.0 |
|-------------------------|----------------|-------------|
| <i>Tensão nominal</i> | 480/277 VAC 3Ø | 400 VAC 3Ø |
| <i>Potência Nominal</i> | 15 KW | 10 KW |
| <i>Tensão de Saída</i> | 220 - 500 VDC | 0 - 500 VDC |

Fonte: (MAGNUMCAP, 2020) e (CHADEMO,2022)

2.5. Conectores para carregamento de veículos elétricos

Os conectores são os dispositivos auxiliares os quais fazem a transmissão de energia bidirecional do posto de carregamento para o veículo elétrico. É necessário entender os diferentes tipos de conectores um carro elétrico, pois o conector depende do tipo de plugue disponível tanto na estação quanto no veículo.

Cada localidade tem um padrão de conector, na Europa há os conectores definidos pelos modelos IEC (*International Eletrotechnic Comission*) 62196, o qual também é utilizado no Brasil. No Japão, é adotado o padrão CHAdeMO e, nos Estados Unidos, o modelo utilizado é conhecido como SAE (*Society of Automotive Engineers*) J1772 (RODRIGUES, 2014). Na figura 8, é possível analisar cada um desses padrões.

Figura 8 – Conectores para carregamento



Fonte: AMARAL, 2022

Uma característica entre esses conectores é que os padrões SAE J1772 e CHAdeMO são incompatíveis entre si, visto que foram desenvolvidos com especificações diferentes e por organizações diferentes. Além disso, os padrões IEC 62196 são os padrões internacionais mais abrangentes, o qual apresenta compatibilidade com ambos os padrões SAE J1772 e o CHAdeMO. Alguns veículos elétricos podem ter adaptadores para permitir a utilização de diferentes tipos de conectores.

2.6. Baterias de veículos elétricos

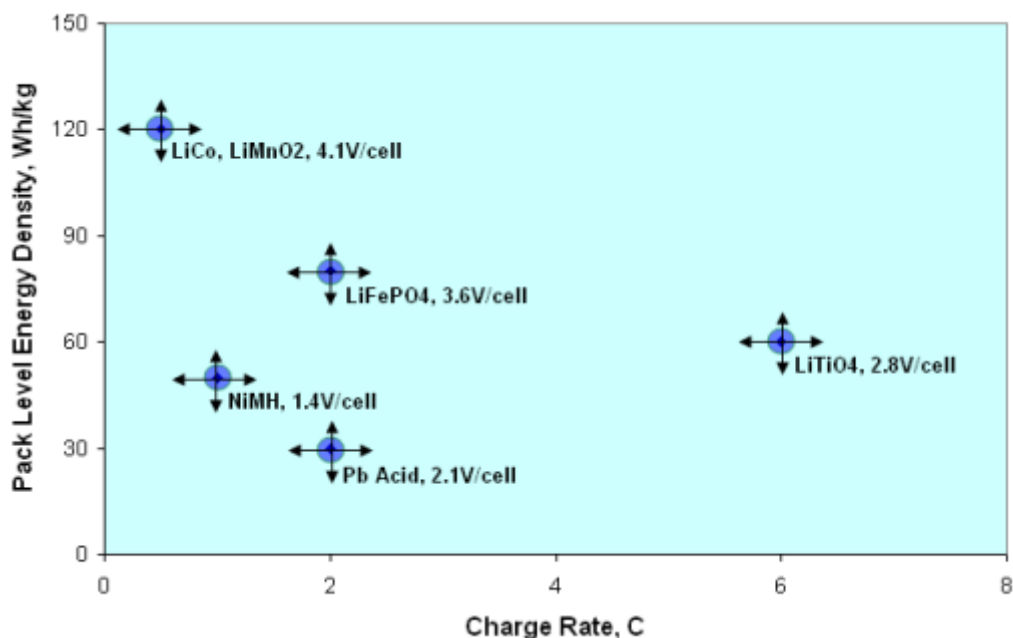
As baterias desempenham um papel essencial no funcionamento do veículo elétrico, em que as suas principais finalidades são a propulsão e o armazenamento de energia desses veículos. Logo, o estudo e a aplicação

dessas baterias no carro elétrico são realizados considerando características como a tensão nominal, a capacidade da bateria, o ciclo de vida, o estado de carga, entre outros.

Atualmente, existem diversas tecnologias de baterias no mercado, como NiMH (Níquel-hidreto metálico), Zebra (*Zeolite Battery Research Africa Project*), entre outras. As baterias de íon-lítio se destacam pela combinação de suas características, como alta densidade energética, capacidade de carga rápida e leveza. Dessa forma, essas vantagens têm contribuído para sua crescente adoção no setor de eletro mobilidade (BERMÚDEZ-RODRÍGUEZ, 2021).

Na figura 9, é possível observar que as baterias de íons de lítio apresentam uma maior energia específica e uma maior taxa de carga que a de chumbo e a de níquel, o que resulta em melhor eficiência e performance. Além disso, sabe-se que para escolher um tipo de bateria, em cada caso, é necessário analisar a tensão nominal, a capacidade da bateria, o ciclo de vida, entre outros aspectos.

Figura 9 – Comparação gráfica entre a energia específica e a taxa de carga



Fonte: BOTSFORD, 2009

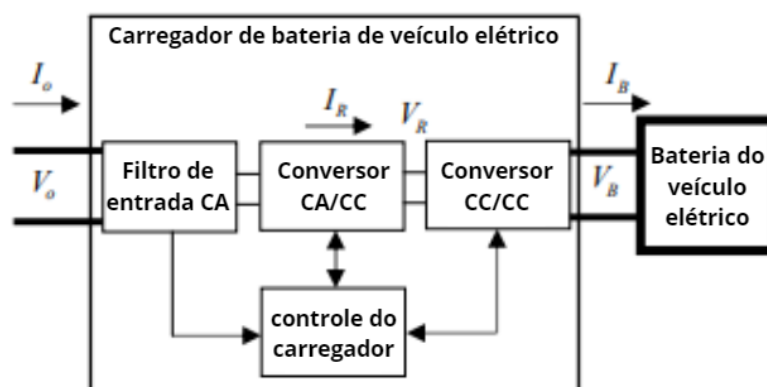
2.7. G2V (*grid-to-vehicle*)

O conceito *grid-to-vehicle* está relacionado com a funcionalidade de carregar o carro elétrico por meio da rede elétrica, ou seja, a energia está vindo da rede e, dessa forma, recarregando o veículo. Ademais, esse carregamento pode ser feito de diversas formas, as quais foram apresentadas nos tipos de carregamento.

Na figura 10, nota-se o funcionamento de um carregador de bateria para veículos elétricos. Inicialmente, tem-se o filtro de entrada CA, o qual serve para remover ruídos e interferências da rede elétrica antes que a corrente seja convertida. No próximo estágio, há o conversor CA/CC, que transforma a corrente alternada em corrente contínua, e o conversor CC/CC, que ajusta a tensão e a corrente contínua para os níveis apropriados exigidos pela bateria do veículo elétrico (HAIDAR, 2014).

Além disso, durante todo o processo o controlador do carregador gerencia o processo de carregamento, garantindo que a corrente e a tensão fornecidas à bateria estejam dentro dos limites seguros e otimizados (HAIDAR, 2014).

Figura 10 – Conectores para carregamento



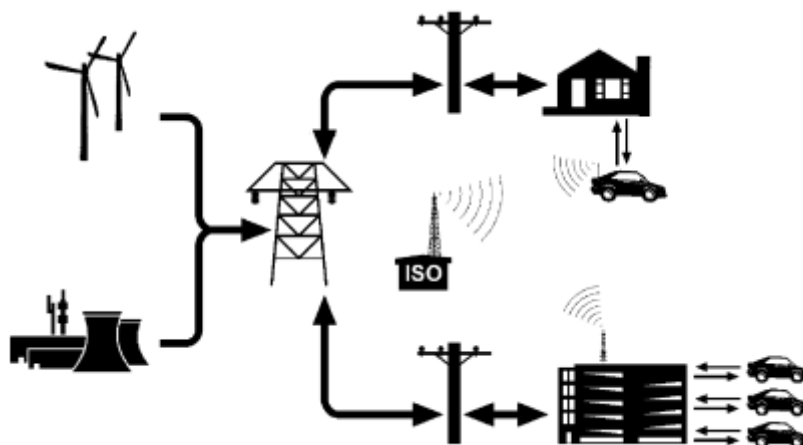
Fonte: HAIDAR,2014

2.8. V2G (*vehicle-to-grid*)

O conceito *vehicle-to-grid* está relacionado com a funcionalidade do veículo elétrico injetar energia na rede, por meio da bateria desse carro. As vantagens do desenvolvimento do V2G incluem um fluxo de receita adicional

para veículos mais ecológicos, maior estabilidade e confiabilidade da rede elétrica, redução dos custos do sistema elétrico e, eventualmente, armazenamento barato e backup para eletricidade renovável (KEMPTON,2005).

Figura 11 – Esquemático do sistema interligado com *vehicle-to-grid*



Fonte: KEMPTON, 2005

Na figura 11, nota-se como a relação dessa arquitetura funciona com a rede elétrica. Inicialmente, tem-se a rede de geração de energia, a qual é representada pela figura de usinas e de geradores eólicos. Em seguida, essa energia passa para a linha de transmissão e, por fim, para o sistema de distribuição, o qual é relacionado e influenciado diretamente com a arquitetura V2G. Nesse caso, a representação do ISO 15118, o qual é uma norma de comunicação e segurança, serve justamente para a relação do veículo elétrico com o posto de recarga, por meio de um operador de sistema, em que permite a atuação do veículo elétrico tanto como uma bateria recarregável ou como uma fonte de energia em momentos de alta demanda de energia elétrica (VAZ, 2019).

Além disso, a padronização da norma permite que diferentes fabricantes de veículos elétricos e as infraestruturas de carregamento se comuniquem de forma segura e interoperável, independentemente da marca ou modelo. Dessa forma, aumenta a conveniência e a acessibilidade para os usuários de VE, além de promover a inovação e a concorrência no mercado de veículos elétricos.

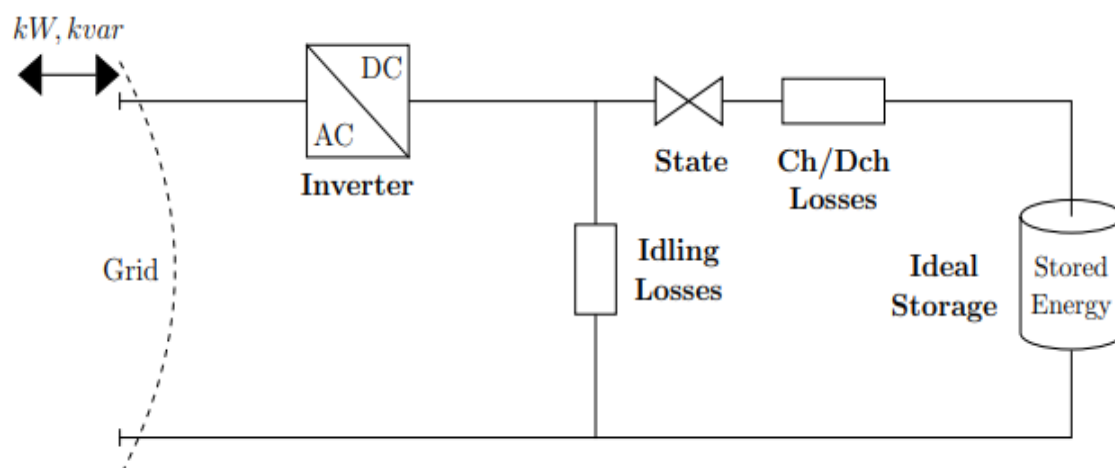
Sobre a aplicabilidade da arquitetura V2G, é importante considerar fatores como a eficiência energética, a segurança da rede, a eficiência econômica e a viabilidade técnica. Ademais, é importante examinar as questões regulatórias e de segurança envolvidas, bem como as necessidades de infraestrutura adicional para suportar a integração de veículos elétricos na rede elétrica (TOYOSHIMA, 2021). Devido a isso, ainda há desafios técnicos a serem superados, como a garantia da segurança da rede e a otimização da eficiência energética.

Atualmente, a arquitetura V2G está em fase de desenvolvimento e teste, em que empresas, universidades e instituições de pesquisa estão estudando e avaliando sua aplicabilidade. A implementação desse recurso gera diversos benefícios, sendo as principais a estabilidade da rede elétrica em momentos de alta demanda, o retorno financeiro ou a compensação de energia pelo fornecimento de energia e o eficiente uso da integração de recursos e tecnologias, em que o veículo elétrico pode ser utilizado para compensar o problema da intermitência das energias renováveis.

2.9. Modelagem de veículo elétrico

O veículo elétrico com tecnologia V2G pode operar em duas situações: carregamento e descarregamento. No modo de carregamento, o veículo retira energia da rede elétrica e a armazena. No modo de descarregamento, ele libera energia de volta para a rede elétrica. Dessa forma, será possível realizar simulações conforme o fabricante de veículo escolhido. Na figura 12, é apresentado o esquemático do elemento *Storage*, o qual representa um elemento de armazenamento e será utilizado para simbolizar o veículo elétrico.

Figura 12 – Esquemático do veículo elétrico



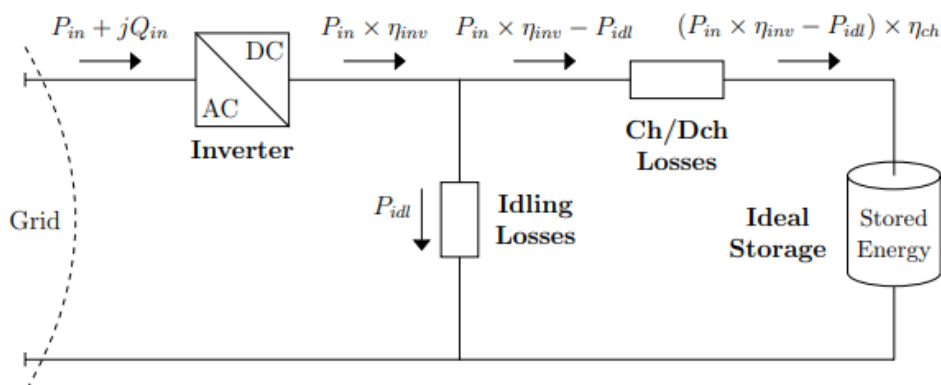
Fonte: EPRI, 2020

Definindo cada componente do esquemático:

- **Inversor AC/DC:** um dispositivo eletrônico que converte a corrente contínua (DC) em corrente alternada (AC), sendo bidirecional, o qual permite que a energia percorra em ambas as direções, ou seja, possa converter a corrente contínua (DC) da bateria do carro em corrente alternada (AC) para alimentar a rede elétrica, assim como converter a corrente alternada (AC) da rede elétrica em corrente contínua (DC) para carregar a bateria do carro elétrico.
- **State (estado):** representa o estado em que o elemento está atuando, nesse caso, terá 3 estados: carregando, descarregando e inatividade.
- **Charging and Discharging Losses (Perdas de carga e descarga):** esse bloco representa as perdas de carga e descarga com a conversão do armazenamento da bateria em cada situação.
- **Idling Losses (perda de inatividade):** representam perdas de auto esgotamento de armazenamento e cargas auxiliares, como por exemplo, controle e equipamentos de comunicação, entre outros, os quais são alimentados pelo mesmo inversor que o armazenamento de energia média/bateria.

2.9.1. Comportamento da arquitetura V2G carregando

Figura 13 – Esquemático do veículo elétrico em estado de carregamento



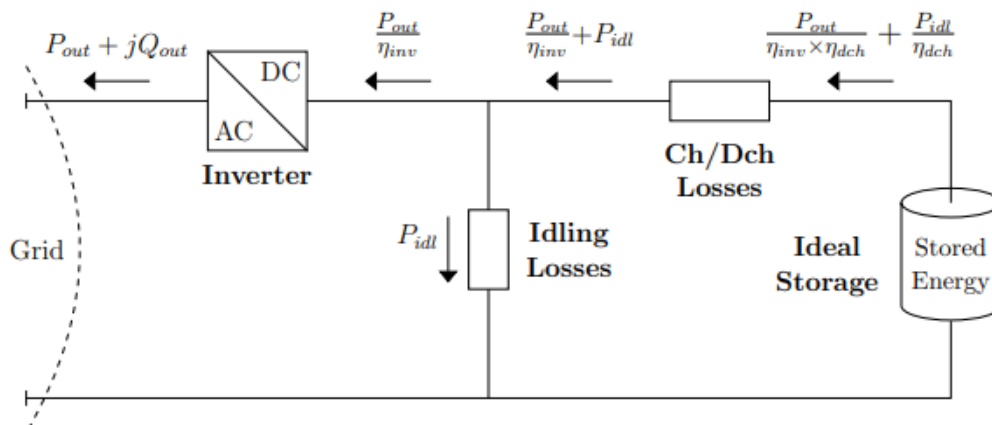
Fonte: EPRI, 2020

Na figura 13, nota-se o funcionamento em estado de carregamento. No esquemático, a potência ativa passa pelo inversor convertendo a energia AC em energia DC, porém essa conversão tem uma perda relacionada com eficiência do inversor. Posteriormente, tem-se o *idling losses*, que representa as perdas da alimentação de equipamentos e dos controles de comunicação externos.

Por conseguinte, ocorre a última perda relacionada com a eficiência de recarga. Após todas essas etapas, a energia que sobrou é armazenada no bloco indicado como *Stored Energy*.

2.9.2. Comportamento da arquitetura V2G descarregando

Figura 14 – Esquemático do veículo elétrico em estado de descarregamento



Fonte: EPRI, 2020

Na figura 14, nota-se o funcionamento em estado de descarregamento. No esquemático, a potência ativa sai do bloco *Stored Energy*, e, conseqüentemente, passa por todas as etapas de perdas, descritas anteriormente, até chegar à rede. Nesse sentido, é realizado o cálculo de todas as perdas logo após a saída de energia do bloco para a potência P_{out} chegar à rede em seu valor determinado.

2.10. Conclusão

Este capítulo apresentou uma visão geral sobre veículos elétricos, abordando aspectos que são fundamentais para estudar e entender a tecnologia *Vehicle-to-Grid*. Utilizando os parâmetros de potência nominal e tensão nominal dos modelos de estações V2G, entendendo o funcionamento bidirecional e as baterias dos veículos, pode-se realizar as simulações subsequentes no *OpenDSS*.

Logo, essas simulações serão essenciais para avaliar o impacto da tecnologia V2G em sistemas de distribuição de energia. No próximo capítulo, será apresentada a metodologia utilizada para realizar as simulações, fundamentada nas informações apresentadas desse capítulo. Dessa forma, será investigado o comportamento da rede elétrica com a inserção de carros com essa tecnologia, a fim de analisar a viabilidade e os impactos ocasionados.

3. METODOLOGIA

3.0. Introdução

Nesse trabalho, empregou-se uma metodologia baseada na simulação de uma rede de distribuição de energia teste utilizando *software OpenDss*, alocando ao longo dessa rede elétrica um conjunto eletropostos que possuíam embarcado a arquitetura V2G. Nesse caso, a escolha do *OpenDss* foi motivada pela possibilidade de modelar o conjunto eletroposto e veículo elétrico para realizar estudos de fluxo de carga, além de apresentar código aberto, o que oferece diversos recursos e ferramentas que facilitam avaliação do desempenho de sistemas de distribuição de energia.

A arquitetura V2G é um conceito recente na indústria de energia elétrica que permite a integração de veículos elétricos à rede de distribuição de energia, isso possibilita o armazenamento de energia elétrica em baterias de veículos elétricos e a sua utilização para abastecer outros equipamentos ou a injeção de energia na rede em momentos de alta demanda.

Para a elaboração desse estudo, é necessário coletar informações detalhadas sobre a capacidade da bateria do veículo elétrico adotado. Além disso, é necessário ter dados específicos sobre a rede de distribuição que será utilizada nas simulações e compreender o funcionamento dos elementos que compõem o sistema, como as cargas, capacitores, modelo de linha de transmissão e transformador inseridos na rede. Todos esses assuntos serão explorados nesse capítulo.

Também é fundamental compreender o funcionamento dos elementos que compõem o sistema, como inversores, controladores de carga e sistemas de comunicação, que permitem a integração eficiente dos VEs à rede. Por fim, a definição de cenários realistas e representativos é crucial para avaliar os impactos do V2G (Vehicle-to-Grid) na rede de distribuição. Esses cenários devem considerar variações na penetração de veículos elétricos, padrões de uso, disponibilidade de energia renovável e condições operacionais da rede, permitindo a geração de resultados robustos e aplicáveis.

Dessa forma, é possível realizar uma viabilidade da utilização de eletropostos com a arquitetura V2G em redes de distribuição de energia elétrica, contribuindo para o desenvolvimento de soluções eficientes em termos energéticos.

Esse capítulo apresenta as principais tecnologias de veículos elétricos que existem no mercado, além de apresentar a metodologia a ser adotada no trabalho e as características técnicas da rede elétrica teste e seus dispositivos.

3.1. Fabricante adotado para o veículo elétrico

O Nissan Leaf foi escolhido como modelo de veículo elétrico para ser utilizado nas simulações da rede de distribuição V2G devido às suas características técnicas e comerciais. O veículo possui uma bateria de 40 kWh e está disponível no mercado há alguns anos, o que facilita o acesso a informações técnicas e de desempenho.

Além disso, o Nissan Leaf é um modelo bastante popular e representativo do mercado de veículos elétricos, utilizado em diversas pesquisas e projetos na área de V2G. Dessa forma, a escolha do Nissan Leaf como modelo de veículo elétrico contribui para a maior representatividade dos resultados em relação às condições reais.

Nas figuras 15 e 16, pode-se analisar os aspectos físicos do carro e também uma característica desse modelo: a apresentação de dois tipos de conectores. O Nissan Leaf apresenta o conector SAE J1772, cujo objetivo principal é a recarga lenta com alimentação em corrente alternada, e o CHAdeMO, cuja a maior finalidade é a recarga rápida em corrente contínua.

Figura 15 – Nissan Leaf

Fonte: NISSAN, 2023

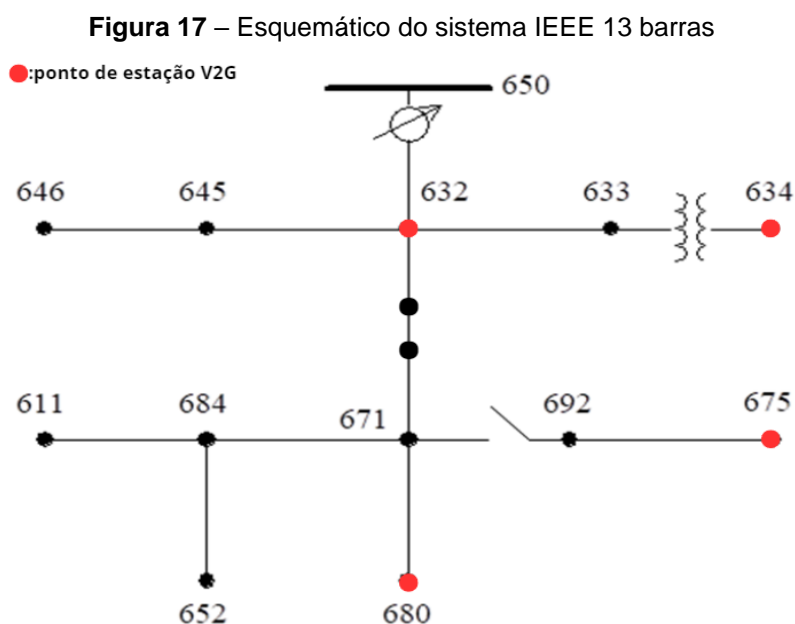
Figura 16 – Nissan Leaf conectores de para recarga

Fonte: NISSAN, 2023

3.2. Modelo adotado para rede de distribuição

Para a realização das simulações de fluxo de carga, será adotado um dos modelos de rede desenvolvidos pelo *The Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), o qual fornecem uma representação realista e padronizada das redes de distribuição de energia elétrica, e, portanto, permite a avaliação do desempenho e o estudo dos impactos da integração do V2G na rede elétrica.

O sistema elétrico adotado para fazer as simulações é o IEEE 13 barras, o qual opera em 4,16 kV. Essa rede é relativamente pequena, em que apresenta um único regulador de tensão na subestação, linhas aéreas e subterrâneas, capacitores de derivação, um transformador em linha e cargas desbalanceadas. Essas características podem ser observadas no diagrama unifilar apresentado na Figura 17 (IEEE, 1992). Além disso, os pontos de estação V2G inseridos na rede estão destacados em vermelho, a escolha desses locais foi feita com base na análise de curto circuito.



Fonte: IEEE, 1992

As conexões entre os barramentos e as cargas possuem diferentes configurações adotadas em cada casa. Os dados de configuração das linhas aéreas são:

Tabela 3 – configuração das linhas aéreas:

| Configuração | Sequência de Fase | Condutor (ACSR) | Neutro (ACSR) | Espaçamento |
|--------------|-------------------|-----------------|---------------|-------------|
| 601 | B A C N | 556,500 26/7 | 4/0 6/1 | 500 |
| 602 | C A B N | 4/0 6/1 | 4/0 6/1 | 500 |
| 603 | C B N | 1/0 | 1/0 | 505 |
| 604 | A C N | 1/0 | 1/0 | 505 |
| 605 | C N | 1/0 | 1/0 | 510 |

Fonte: IEEE, 1992

Os dados de configuração das linhas subterrâneas são:

Tabela 4 – configuração das linhas subterrâneas:

| Configuração | Sequência de Fase | Condutor | Neutro | Espaçamento |
|--------------|-------------------|----------------|--------|-------------|
| 606 | A B C N | 250,000 AA, CN | None | 515 |
| 607 | A N | 1/0 AA, TS | 1/0 Cu | 520 |

Fonte: IEEE, 1992

Os dados de configuração dos transformadores são:

Tabela 5 – configuração dos transformadores:

| | kVA | kV-high | kV-low | R-% | X-% |
|-------------|-----|-------------|-------------|-----|-----|
| Subestação: | 5 | 115 - D | 4.16 Gr. Y | 1 | 8 |
| XFM - 1 | 500 | 4.16 – Gr.W | 0.48 – Gr.W | 1.1 | 2 |

Fonte: IEEE, 1992

Os dados de configuração dos capacitores são:

Tabela 6 – configuração dos capacitores:

| Barramento | fase A (kVar) | fase B (kVar) | fase C (kVar) |
|------------|---------------|---------------|---------------|
| 675 | 200 | 200 | 200 |
| 611 | | | 100 |
| Total | 200 | 200 | 300 |

Fonte: IEEE, 1992

As cargas pontuais apresentam modelos de cargas, Potência constante (PQ), Impedância constante (Z), ou Corrente constante (I), e as formas de conexão, estrela (Y) ou delta (D). Os dados de configuração das cargas pontuais são:

Tabela 7 – configuração das cargas pontuais:

| Barra-mento | Modelo de Carga | Fase A (kW) | Fase A (kVar) | Fase B (kW) | Fase B (kVar) | Fase C (kW) | Fase C (kVar) |
|-------------|-----------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|
| 634 | Y-PQ | 160 | 110 | 120 | 90 | 120 | 90 |
| 645 | Y-PQ | 0 | 0 | 170 | 125 | 0 | 0 |
| 646 | D-Z | 0 | 0 | 230 | 132 | 0 | 0 |
| 652 | Y-Z | 128 | 86 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| | | | | | | | |
|-----|-------|------|-----|-----|-----|------|-----|
| 671 | D-PQ | 385 | 220 | 385 | 220 | 385 | 220 |
| 675 | Y-PQ | 485 | 190 | 68 | 60 | 290 | 212 |
| 692 | D-I | 0 | 0 | 0 | 0 | 170 | 151 |
| 611 | Y-I | 0 | 0 | 0 | 0 | 170 | 80 |
| | TOTAL | 1158 | 606 | 973 | 627 | 1135 | 753 |

Fonte: IEEE, 1992

Os dados de configuração das cargas distribuídas são:

Tabela 8 – configuração da carga distribuída:

| Barre mento Inicial | Barrame nto Final | Modelo de Carga | Fase A (kW) | Fase A (kVar) | Fase B (kW) | Fase B (kVar) | Fase C (kW) | Fase C (kVar) |
|---------------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------|---------------------|-------------------|---------------------|-------------------|---------------------|
| 632 | 671 | Y-PQ | 17 | 10 | 66 | 38 | 117 | 68 |

Fonte: IEEE, 1992

Os dados de configuração dos segmentos de linha presentes na rede de distribuição:

Tabela 9 – configuração dos segmentos de linha:

| Barramento Inicial | Barramento Final | Comprimento (ft) | Configuração |
|--------------------|------------------|------------------|--------------|
| 632 | 645 | 500 | 603 |
| 632 | 633 | 500 | 602 |
| 633 | 634 | 0 | XFM-1 |
| 645 | 646 | 300 | 603 |
| 650 | 632 | 2000 | 601 |
| 684 | 652 | 800 | 607 |
| 632 | 671 | 2000 | 601 |
| 671 | 684 | 300 | 604 |
| 671 | 680 | 1000 | 601 |
| 671 | 692 | 0 | Switch |
| 684 | 611 | 300 | 605 |
| 692 | 675 | 500 | 606 |

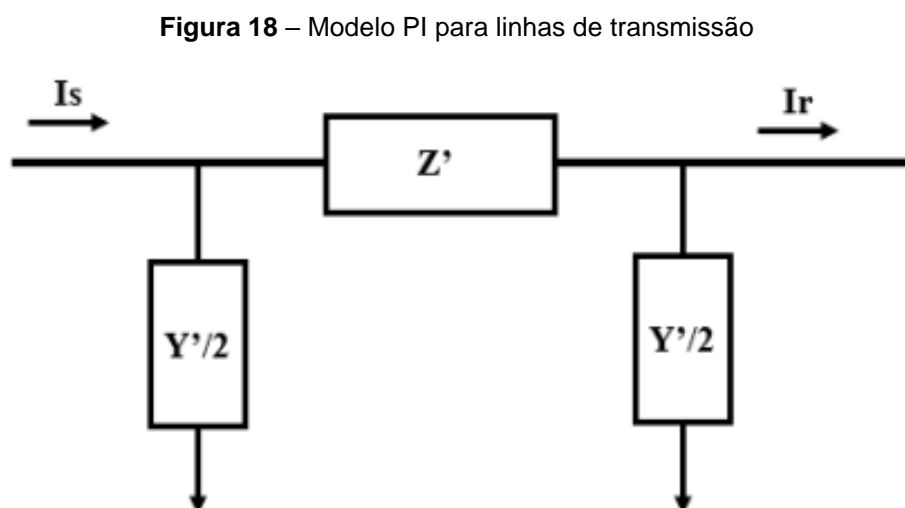
Fonte: IEEE, 1992

3.2.1. Modelagem da rede elétrica

Os elementos utilizados para modelagem dos dispositivos presentes na rede de 13 barras do IEEE para a realização das simulações de fluxo de carga são especificados a seguir.

a) Linhas:

Uma linha de transmissão é essencialmente composta por parâmetros série, que incluem as resistências e reatâncias, além de parâmetros shunt, como condutâncias e susceptâncias, os quais são distribuídos ao longo de toda a extensão do circuito. Nesse sentido, o modelo que representa essas linhas é comumente o modelo PI equivalente, que utiliza parâmetros distribuídos e se aproxima dos resultados reais, sendo adotado pelo *OpenDSS*, como ilustrado na Figura 18.



Fonte: HERNANDEZ, 2017

b) Transformador:

O modelo utilizado pelo *OpenDSS* para simulação de transformadores em redes de distribuição é conhecido como Modelo de Arrilaga, conforme ilustrado na Figura 19. Nesse modelo, o transformador é representado de forma simplificada por uma impedância série, sendo uma das formas mais básicas e eficazes de representar transformadores em estudos de fluxo de potência e análise de redes.

Figura 19 – Modelo de Arrilaga

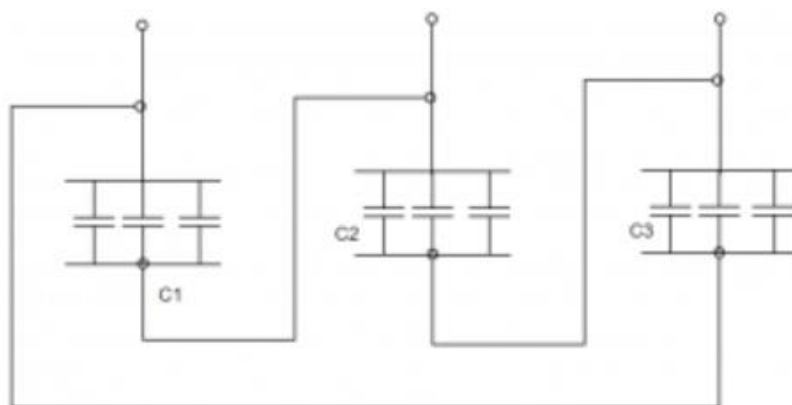


É destacado os componentes principais: a resistência série (R_s) e a reatância (X_h), que são essenciais para simplificar os cálculos de fluxo de potência em redes de distribuição.

c) Capacitor:

O modelo utilizado pelo OpenDSS para simulação é o modelo de capacitor shunt para representar dispositivos de compensação reativa conectados à rede elétrica. Nesse modelo, representado pela figura 20, os capacitores são representados como elementos conectados em paralelo ao sistema elétrico, permitindo a injeção de potência reativa na rede. O objetivo principal desse modelo é equilibrar o fator de potência, reduzir perdas elétricas e melhorar a estabilidade da tensão.

Figura 20 – Modelo de capacitor shunt



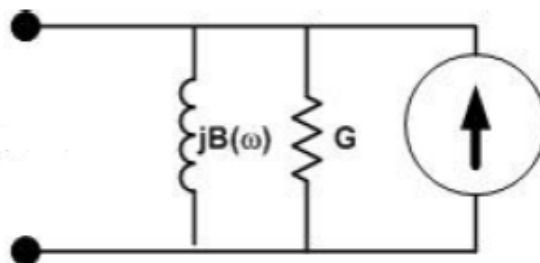
Fonte: WAT ELECTRONICS, 2021

d) Cargas:

O modelo utilizado pelo *OpenDSS*, representado pela figura 21, para simulação de carga é baseado no modelo de Norton para representar as cargas no sistema elétrico de potência. Esse modelo é composto por uma fonte de corrente em paralelo com uma impedância equivalente. A fonte de corrente

representa a injeção de corrente da carga, enquanto a impedância modela os efeitos de resistência e reatância associados à carga.

Figura 21 – Equivalente de Norton



Fonte: EPRI, 2013

3.3. Cenários de simulação

As simulações serão realizadas utilizando o software OpenDss. Dessa forma, por meio dos cenários de simulação será realizada análises para compreender como a integração de veículos elétricos equipados com tecnologia V2G impacta a operação e a estabilidade da rede de distribuição elétrica. Cada cenário representará uma configuração específica de penetração de veículos elétricos e diferentes níveis de participação no V2G, analisando aspectos como a resposta da rede durante picos de demanda, o comportamento das cargas da rede, e do fluxo de energia.

Nesse sentido, as simulações foram realizadas com a função *daily* (simulação diária) na rede IEEE 13 Barras. Esse modo de solução analisa o perfil de carga ao longo de um período de 24 horas, focando em representar as variações de carga e geração que ocorrem em um ciclo diário. Além disso, é necessária para avaliar o comportamento de sistemas de distribuição de energia elétrica em resposta às flutuações diárias de demanda e geração de energia. Os testes feitos utilizaram a tecnologia V2G dos veículos elétricos no horário das 17h às 20h, período considerado de alta demanda, e a tecnologia G2V no horário das 02h às 05h, turno considerado de baixa demanda.

Os veículos elétricos com a tecnologia V2G estarão inseridos nas barras 634, 632, 675 e 680. Além disso, a conexão aos barramentos citados ocorre por meio de um transformador similar ao 633-634. Após essas mudanças, foi

adotado valor de 480V e potência de saída de 5 kW para representar os parâmetros das estações V2G representando o FE-15.

Na tabela 10, é apresentada a quantidade de veículos elétricos inseridos em cada barramento para cada um dos cenários simulados, aumentado a quantidade de carros em cada cenário. Além disso, o cenário 1 e 2 foram simulados com ponto operativo de cargas constantes, para analisar o impacto do V2G sem a variação da demanda das cargas ao longo do dia. O cenário 3 adota um ponto operativo de cargas variáveis, em que é possível avaliar essa influência do V2G na rede de distribuição em uma condição mais próxima da realidade.

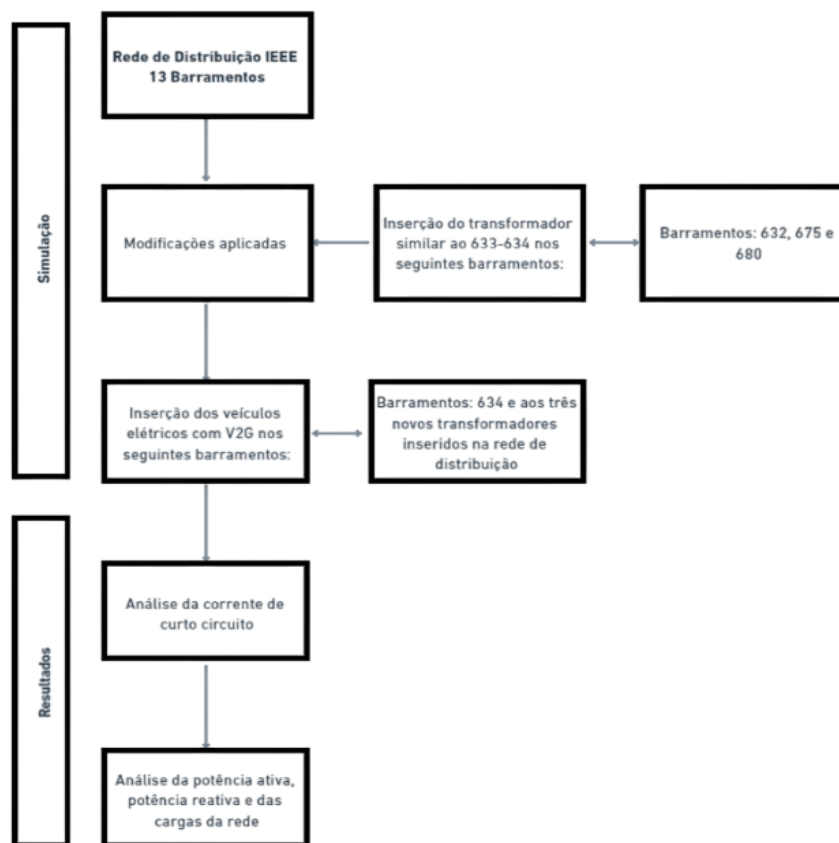
Tabela 10 – Quantidade de veículos em cada simulação

| Cenários | Quantidade de Veículos em cada barramento | Ponto operativo das cargas |
|-----------------|--|-----------------------------------|
| 1 | 1 | Cargas constantes |
| 2 | 5 | Cargas constantes |
| 3 | 20 | Cargas variáveis |

O comportamento da carga adotado no cenário 3 reflete o perfil de consumo típico de uma residência, no qual há um pico de demanda de energia entre 18h e 22h. Pelo período da madrugada, observa-se uma redução significativa no consumo de energia, resultando em baixa demanda de energia elétrica entre 00h e 05h.

Na figura 22, é demonstrado o fluxograma de uma sequência de etapas para simular e analisar os impactos da inserção da tecnologia V2G na rede IEEE de 13 barramentos. Começando com modificações na infraestrutura, passando pela inserção dos veículos elétricos com V2G, e terminando em uma análise detalhada das correntes de curto-circuito e das potências ativas, reativas, tensão, etc.

Figura 22 – Fluxograma da pesquisa



3.4. Conclusão

Dessa forma, é possível realizar as simulações de acordo com a metodologia apresentada, em que desenvolve a simulação da rede elétrica de acordo com o que foi adotado, como é o caso do veículo elétrico Nissan Leaf. A modelagem desse carro será baseada na bateria de 40 kWh, em que sua injeção de energia será no horário das 17h às 20h e o período de recarga será no horário das 02h às 05h. A definição da tensão de 480 V e da potência de saída de 5 kW foi estabelecida com base nos parâmetros da estação de recarga FE-15.

A utilização da rede elétrica IEEE 13 barras promove a criação de um ambiente de simulação que reflete de maneira precisa as condições reais de operação da rede elétrica. Além disso, todos os cenários de simulação, que possibilitaram a análise dos diferentes impactos e comportamentos do sistema em situações variadas. Logo, os resultados serão próximos do que ocorreria em uma situação real, proporcionando conclusões práticas e aplicáveis para aprimorar a estabilidade e a eficiência da rede elétrica da aplicação do V2G.

4. RESULTADOS

4.0. Introdução

Neste capítulo, serão apresentados os cenários de simulação da tecnologia *Vehicle-to-Grid*, utilizando o software OpenDss, assim como os resultados e análises referentes ao impacto que a tecnologia V2G provoca nas redes elétricas de distribuição de energia.

Inicialmente, um teste de curto-circuito foi realizado para avaliar o comportamento das barras sob condições de falha e determinar quais áreas da rede são mais robustas e quais apresentam maior vulnerabilidade. De acordo com os resultados será definido os locais de implementação da estação V2G.

Nesse sentido, tem-se simulações de 3 cenários diferentes, o cenário 1 e 2 foram simulados com o mesmo ponto operativo específico sendo diferentes pela quantidade de veículos elétricos conectados no sistema. Além disso, o cenário 3 é feito com um ponto operativo diferente dos outros dois, o qual se aproxima mais da realidade com a variação das cargas ao longo do dia.

Cada cenário simulado considerará diferentes condições operacionais com capacidade de intercâmbio bidirecional de energia. Outrossim, os resultados desse estudo ajudaram na compreensão do planejamento eficiente da implantação da tecnologia V2G, por meio das análises de tensões, correntes e perdas de potência, auxiliando no planejamento e nas estratégias para uma integração eficiente dos veículos elétricos na rede.

4.1. Teste de curto circuito

O teste de curto-circuito auxilia na análise para o estudo de redes de distribuição de energia elétrica, com o objetivo de avaliar as correntes de curto-circuito e fornecer informações sobre os pontos da rede elétrica que são robustos e fracos, para, dessa forma, auxiliar a determinação da melhor localização para a implementação de estações V2G. Logo, esse estudo ajuda no entendimento sobre a rede, e como tratar a injeção e retirada de energia de maneira segura e eficiente.

Nas tabelas 11 e 12, são apresentados os resultados da simulação de curto-circuito na rede elétrica do IEEE de 13 barras, é possível obter os níveis de corrente de curtos-circuitos em todos barramentos da rede, no qual pode-se observar que a barra 634 e 632 apresentam os maiores níveis de curto-circuito da rede, logo são barras com maior robustez da rede elétrica. Por outro lado, 611 e 652 são as barras que apresentam o menor nível de curto-circuito, e, portanto, apresentando menor robustez.

Tabela 11 – Correntes de curto circuito

| Corrente das simulações de curto circuito (A) | | | |
|--|------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Barramento | Falta Trifásica | Falta monofásica | Falta bifásica |
| 633 | 7775 | 4463 | 6806 |
| 634 | 18691 | 15640 | 16150 |
| 671 | 5419 | 2949 | 4818 |
| 645 | 5673 | 4172 | 5463 |
| 646 | 4757 | 3523 | 4530 |
| 692 | 5419 | 2949 | 4818 |
| 675 | 4811 | 2749 | 4283 |
| 611 | 2248 | 2248 | 0 |
| 652 | 2172 | 2172 | 0 |
| 670 | 8127 | 4434 | 7254 |
| 632 | 10834 | 5932 | 9689 |
| 680 | 4282 | 2348 | 3827 |
| 684 | 3828 | 2594 | 3703 |

Tabela 12 – Impedância, Reatância e resistência de sequência zero e positiva

| Barramento | NumNodes | R1 | X1 | R0 | X0 | Z1 | Z0 |
|-------------------|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 633 | 3 | 0,133 | 0,288 | 0,382 | 0,856 | 0,317 | 0,938 |
| 634 | 3 | 0,007 | 0,013 | 0,010 | 0,020 | 0,014 | 0,022 |
| 671 | 3 | 0,161 | 0,423 | 0,611 | 131,703 | 0,453 | 145,197 |
| 645 | 2 | 0,183 | 0,319 | 0,438 | 0,849 | 0,368 | 0,956 |
| 646 | 2 | 0,246 | 0,368 | 0,538 | 0,979 | 0,443 | 111,725 |
| 692 | 3 | 0,161 | 0,423 | 0,611 | 131,703 | 0,453 | 145,197 |
| 675 | 3 | 0,208 | 0,460 | 0,744 | 133,937 | 0,505 | 153,214 |
| 611 | 1 | 0,471 | 0,856 | 0,471 | 0,856 | 0,977 | 0,977 |
| 652 | 1 | 0,590 | 0,835 | 0,590 | 0,835 | 102,287 | 102,287 |
| 670 | 3 | 0,104 | 0,287 | 0,386 | 0,888 | 0,305 | 0,968 |
| 632 | 3 | 0,077 | 0,217 | 0,281 | 0,671 | 0,230 | 0,727 |
| 680 | 3 | 0,196 | 0,536 | 0,735 | 16,782 | 0,571 | 183,211 |
| 684 | 2 | 0,229 | 0,469 | 0,725 | 138,844 | 0,522 | 156,613 |

Além disso, a inserção da estação de V2G em determinados barramentos foi determinada de acordo com os resultados da análise de curto-circuito e demanda das cargas do sistema. Nesse sentido, o barramento 632 foi escolhido por ser um ponto central de todo o sistema de distribuição e por ser uma barra com robustez da rede elétrica. Assim como a barra 632, o barramento 634 foi escolhido por seu resultado no teste de curto-circuito, mas, diferentemente da 632, ela está localizada na extremidade da rede.

Os outros barramentos como 680 e 675 foram escolhidos por estarem no extremo da rede e apresentando uma corrente de curto-circuito consideravelmente menor quando comparada com o barramento 634, porém sendo resultados de corrente de curto circuito que estão próximos da média.

Nesse sentido, os barramentos 634 e 632 foram selecionados para avaliar o impacto do V2G em barras robustas, enquanto os barramentos 680 e 675 foram escolhidos para analisar esse impacto em barras com robustez menor, mas próxima da média, além de estarem localizados na extremidade da rede de distribuição.

Além disso, as barras 634, 675 e 632 possuem cargas próximas que demandam energia, enquanto a barra 680, por não possuir cargas ou outros componentes conectados diretamente, refletirá exclusivamente a influência dos veículos elétricos.

4.2. Cenário 1

No cenário 1, foi estabelecido que o momento de injeção de energia dos veículos elétricos ocorra no horário das 17h às 20h, período considerado de alta demanda, e o momento de carregamento ocorra no horário das 02h às 05h, turno considerado de baixa demanda.

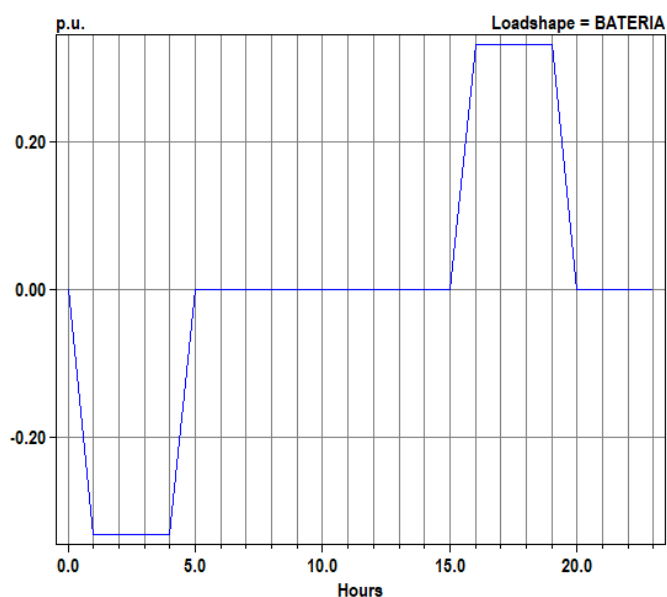
As simulações foram determinadas com o parâmetro de análise de 48 horas, em que retorna 48 intervalos para realizar o estudo. Os resultados gráficos e numéricos obtidos têm como objetivo apresentar as mudanças que a inserção da injeção de energia e carregamento da bateria dos veículos podem

gerar na rede, observando e comparando potência ativa, potência reativa, gráficos dos veículos elétricos, gráficos das cargas, entre outros.

Nesse cenário, foi inserido apenas um veículo com capacidade 40 kWh, valor comercial da capacidade do Nissan Leaf, em cada um dos barramentos 634, 680, 675 e 632. Sobre a representação da tensão nominal das estações de recarga foi adotado o valor de 480V, o qual é o valor comercial do carregador bidirecional FE-15.

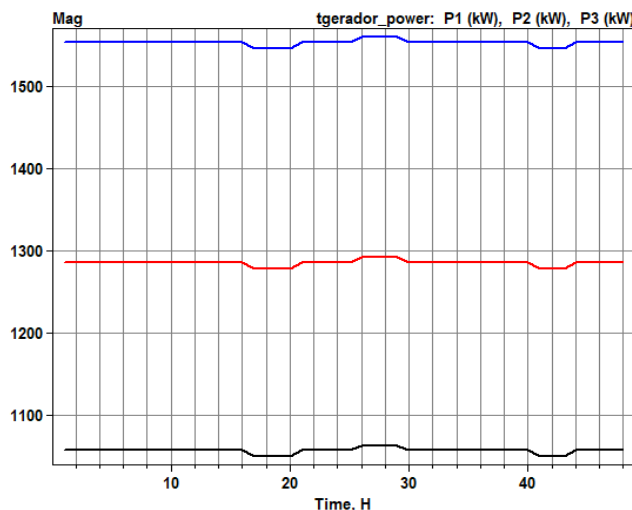
Além disso, a potência de saída escolhida foi de 5 kW, em que representa uma taxa de descarga de 1/8 C para uma bateria de 40 kWh. Isso significa que, ao descarregar a bateria a 5 kW, ela levaria cerca de 8 horas para se esgotar completamente, caso estivesse com carga máxima. De acordo com a figura 23, é apresentado os momentos em que os veículos elétricos carregam (parte negativa do gráfico) e injetam energia (parte positiva do gráfico).

Figura 23 – Curva de carga da bateria



A inserção dessas 4 unidades de carros elétricos na rede não gerou muitas mudanças em questão de potência ativa. Isso se observa com a obtenção de resultados praticamente iguais ao estado inicial, os quais podem ser vistos na figura 24, com baixas oscilações nos momentos de carga e descarga durante o funcionamento do transformador antes da barra 650.

Figura 24 – Gráfico da potência do transformador ao longo do tempo

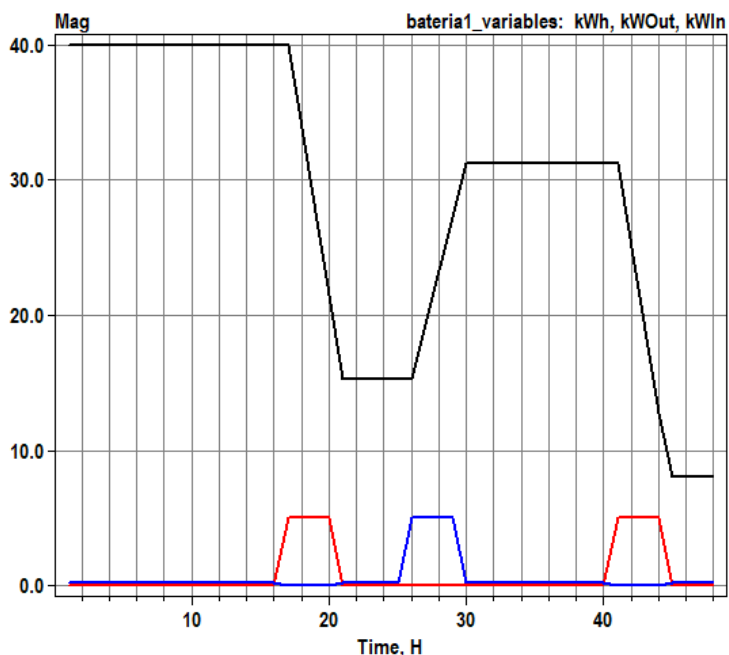


Na figura 25, é possível constatar a quantidade de energia na bateria de um veículo elétrico juntamente com os seus momentos de carga e descarga. Nesse sentido, a linha preta mostra o estado de carga da bateria em kWh ao longo do tempo, a linha vermelha representa a potência de saída da bateria quando está injetando energia na rede e a linha azul representa a potência de entrada, ou seja, a quantidade de energia que está sendo usada para recarregar a bateria.

Como foi definido um fator de descarga de $1/8C$, a potência de saída e entrada foram limitadas a uma fração do total de capacidade de carga da bateria. Logo, ao longo de 4 horas o veículo injeta e carrega 20 kWh na rede, o qual não está inserido as perdas desses processos.

A perda relacionada à injeção de energia pelo veículo elétrico resulta em uma quantidade real de energia injetada superior ao valor de 20 kWh, isso significa que, para efetivamente transferir 20 kWh para a rede, o veículo pode acabar gerando um pouco mais de energia para cobrir essas ineficiências. No momento do carregamento, a situação é inversa, a energia armazenada na bateria é inferior a 20 kWh devido a perdas que ocorrem durante o processo.

Figura 25 – Gráfico da capacidade da bateria (preto), potência em momentos de saída (vermelho) e entrada (azul)



Na tabela 13, tem-se os valores de tensão dos barramentos em diferentes condições do veículo elétrico: inativo, injetando energia e carregando. Dessa forma, é possível concluir que quando o veículo está injetando energia alguns barramentos têm uma leve elevação na tensão, como as barras 634, 684, 675 e 611, porém durante o carregamento, há uma sutil queda nas tensões nesses barramentos também.

Nesse caso, a injeção de energia tende a aumentar levemente a tensão na rede e o carregamento de veículos gera uma leve redução nas tensões. Se a quantidade de energia injetada pelos veículos estiver bem balanceada com a demanda de energia local, as tensões nos barramentos tendem a permanecer estáveis, sem alterações significativas (LOPES, 2011).

Tabela 13 – Tensão dos barramentos

| Veículo | inativo | injetando energia | carregando |
|-------------------|----------------|--------------------------|-------------------|
| Barramento | p.u. | | |
| 650 | 0.9999 | 0.9999 | 0.9999 |
| 633 | 1.018 | 1.018 | 1.018 |
| 634 | 0.9976 | 0.9978 | 0.9973 |
| 632 | 1.021 | 1.021 | 1.021 |
| 675 | 0.9986 | 0.9988 | 0.9984 |

| | | | |
|------------|--------|--------|--------|
| 680 | 1.001 | 1.001 | 1 |
| 671 | 1.001 | 1.001 | 1 |
| 645 | 1.016 | 1.016 | 1.016 |
| 646 | 1.016 | 1.016 | 1.015 |
| 692 | 1.001 | 1.001 | 1 |
| 611 | 0.9592 | 0.9595 | 0.9591 |
| 652 | 0.9791 | 0.9793 | 0.9789 |
| 670 | 1.013 | 1.013 | 1.013 |
| 684 | 0.9846 | 0.9849 | 0.9844 |

Nas tabelas 14,15 e 16 é apresentado as correntes nas linhas do sistema sob três condições diferentes. É possível inferir por meio da tabela 14, momento em que os veículos elétricos não estão interagindo com a rede, a maioria das linhas estão dentro do percentual normal de funcionamento, sendo exceção as linhas 632-670 e 670-671.

A tabela 15 e 16 apresentam o momento em que ocorre a injeção de energia e o carregamento dos veículos elétricos, respectivamente. Analisando os resultados, nota-se que no momento de injeção ocorre uma diminuição na corrente das linhas do sistema de distribuição e no momento de carregamento ocorre um aumento dessas correntes.

Porém, esse fato só ocorre em linhas os quais estão conectadas com um barramento que apresenta uma estação de recarga próxima, como exemplo as linhas 632-670, 671-680, 632-633, 670-671, 692-675 e 671-692 que estão diretamente ligadas ou próximas aos barramentos com estações de recarga.

Por outro lado, no caso de linhas afastadas das estações de recarga, como as linhas 671-684, 684-611, 684-652, 645-646 e 632-645, praticamente não houve alteração significativa no valor da corrente. Logo, mesmo com a presença das operações de V2G nos barramentos vizinhos, as linhas que estão distantes dos pontos de influência direta das estações de recarga, mantêm seus níveis de corrente quase inalterados.

Tabela 14 – Corrente nas linhas com veículo inativo

| Elemento | I | Normal (%) | Emergência (%) |
|-------------|----------|------------|----------------|
| LINE.632670 | 390.96 | 120.19 | 80.13 |
| LINE.670671 | 359.69 | 118.17 | 78.78 |
| LINE.671680 | 0.067372 | 0.02 | 0.01 |
| LINE.632633 | 68.85 | 20.41 | 13.61 |
| LINE.632645 | 118.33 | 30.07 | 20.04 |
| LINE.645646 | 37.37 | 9.40 | 6.27 |
| LINE.692675 | 119.9 | 51.53 | 34.35 |
| LINE.671684 | 62.93 | 15.73 | 10.49 |
| LINE.684611 | 71.146 | 17.79 | 11.86 |
| LINE.684652 | 62.93 | 15.73 | 10.49 |
| LINE.671692 | 142.4 | 57.59 | 38.39 |

Tabela 15 – Corrente nas linhas com veículo injetando energia

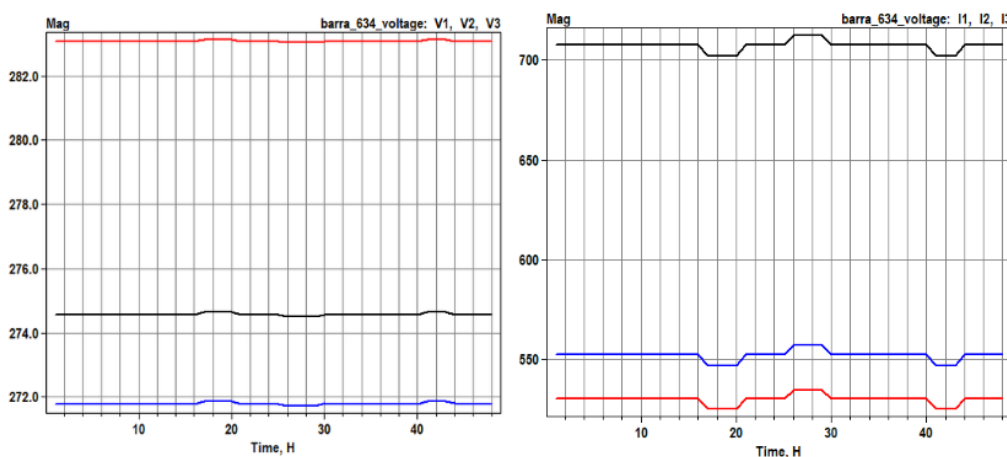
| Elemento | I | Normal (%) | Emergência (%) |
|-------------|--------|------------|----------------|
| LINE.632670 | 389.44 | 119.81 | 79.88 |
| LINE.670671 | 358.18 | 117.79 | 78.53 |
| LINE.671680 | 0.6937 | 0.18 | 0.12 |
| LINE.632633 | 68.22 | 20.25 | 13.50 |
| LINE.632645 | 118.34 | 30.07 | 20.04 |
| LINE.645646 | 37.38 | 9.40 | 6.27 |
| LINE.692675 | 119.12 | 51.32 | 34.21 |
| LINE.671684 | 62.95 | 15.74 | 10.49 |
| LINE.684611 | 71.147 | 17.79 | 11.86 |
| LINE.684652 | 62.95 | 15.74 | 10.49 |
| LINE.671692 | 141.61 | 57.39 | 38.26 |

Tabela 16 – Corrente nas linhas com veículo carregando

| Elemento | I | Normal (%) | Emergência (%) |
|-------------|--------|------------|----------------|
| LINE.632670 | 392.21 | 120.51 | 80.34 |
| LINE.670671 | 360.95 | 118.49 | 78.99 |
| LINE.671680 | 0.6941 | 0.18 | 0.12 |
| LINE.632633 | 69.381 | 20.55 | 13.70 |
| LINE.632645 | 118.31 | 30.06 | 20.04 |
| LINE.645646 | 37.374 | 9.40 | 6.27 |
| LINE.692675 | 120.54 | 51.70 | 34.47 |
| LINE.671684 | 62.925 | 15.73 | 10.49 |
| LINE.684611 | 71.146 | 17.79 | 11.86 |
| LINE.684652 | 62.925 | 15.73 | 10.49 |
| LINE.671692 | 143.05 | 57.76 | 38.51 |

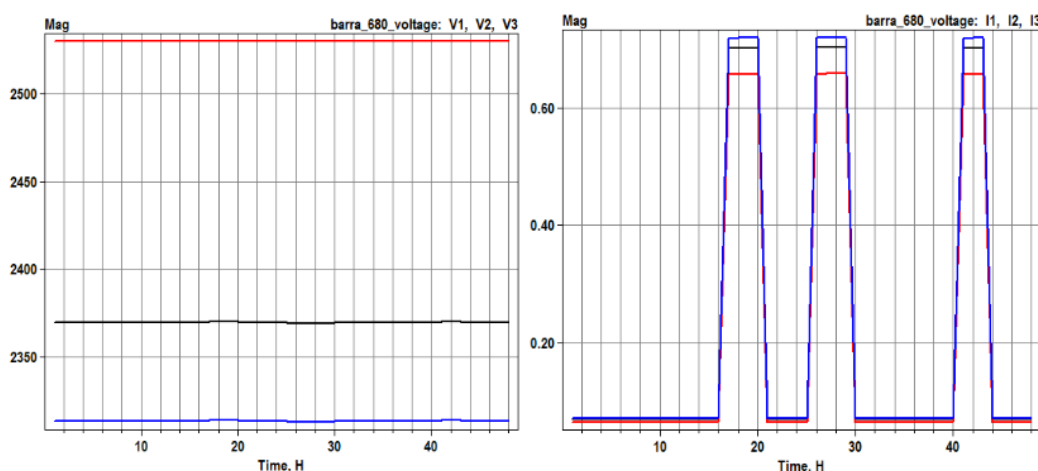
Na figura 26, é apresentado o comportamento da tensão e da corrente na barra 634 ao longo do tempo. Primeiramente, observa-se que a tensão se mantém relativamente estável com pequenas flutuações em torno de 284 a 282 volts, um leve aumento no momento de injeção de energia e uma leve queda no momento de carregamento. Sobre a corrente, ocorre uma diminuição da corrente durante o período de injeção de energia e a corrente aumenta durante o período de recarga.

Figura 26 – Gráfico da tensão (esquerda) e corrente (direita) ao longo do tempo na barra 634



Na figura 27, nota-se um aumento de corrente tanto no momento de injeção de energia quanto durante o carregamento do veículo elétrico. Esse fato pode ocorrer por causa que a barra 680 não possui cargas conectadas diretamente a ela, ao contrário da barra 634, que possui carga local.

Figura 27 – Gráfico da tensão (esquerda) e corrente (direita) ao longo do tempo na barra 680



Na figura 28 e 29, a tensão e a corrente se mantém praticamente constantes nos dois momentos, apresentando um nível de robustez com as variações de energia. Assim como o barramento 680, a barra 632 não tem cargas diretamente conectadas, porém ela apresenta um comportamento da corrente distinto em comparação com a barra 680, pois ela está localizada em uma região central da rede sendo um ponto de passagem para a distribuição de energia, fazendo com que as correntes observadas sejam mais elevadas e estáveis.

Figura 28 – Gráfico da tensão (esquerda) e corrente (direita) ao longo do tempo na barra 675

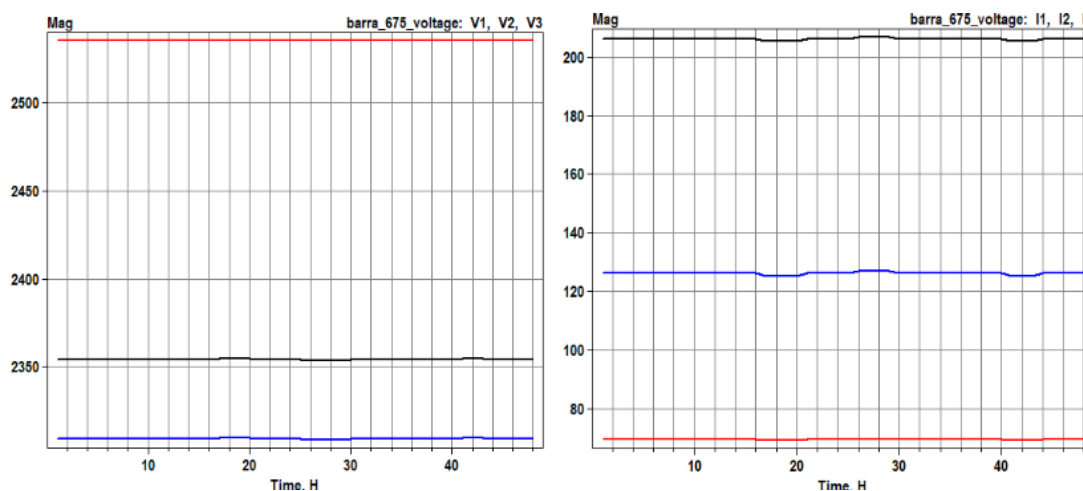
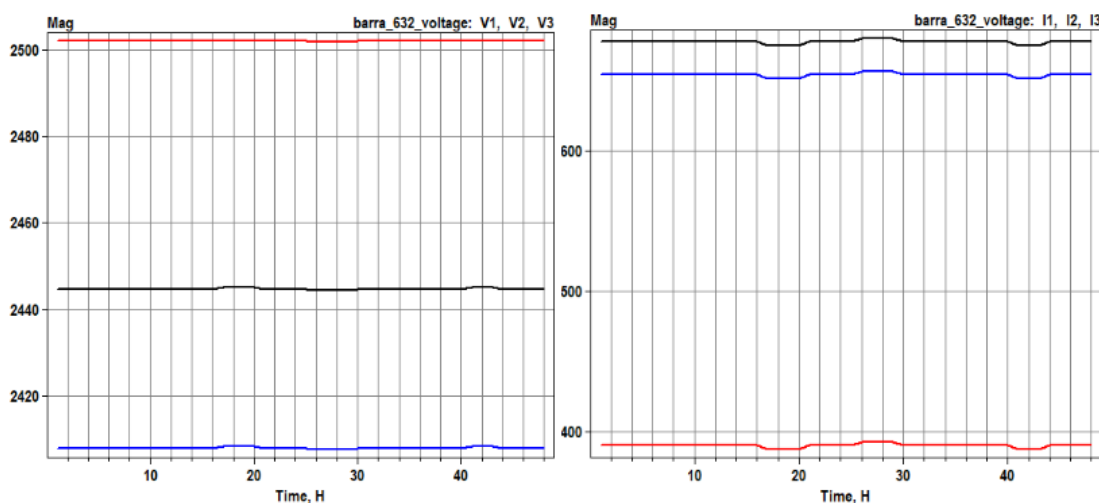


Figura 29 – Gráfico da tensão (esquerda) e corrente (direita) ao longo do tempo na barra 632



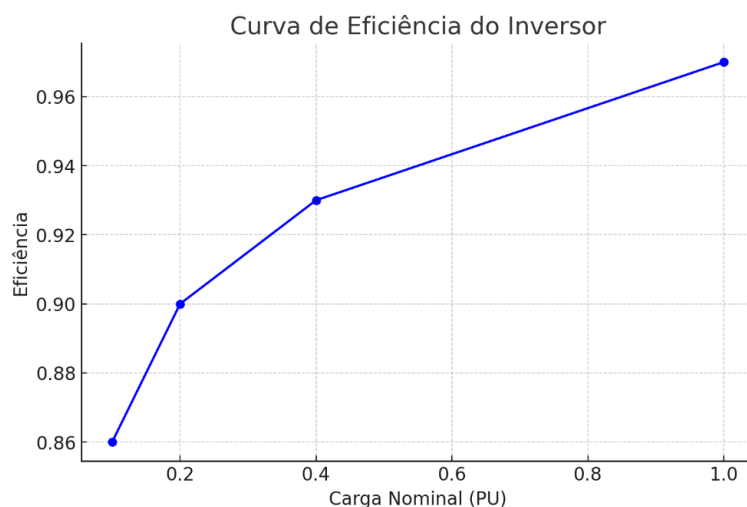
4.2.1. Perdas em momento de descarga e recarga

As perdas de carregamento e descarregamento, inversor e perdas de inatividade são fatores que influenciam diretamente a eficiência da tecnologia V2G. A eficiência de um inversor varia conforme o percentual de sua carga

nominal, em que apresenta menores rendimentos em baixas potências e maior eficiência quando se aproxima da capacidade nominal.

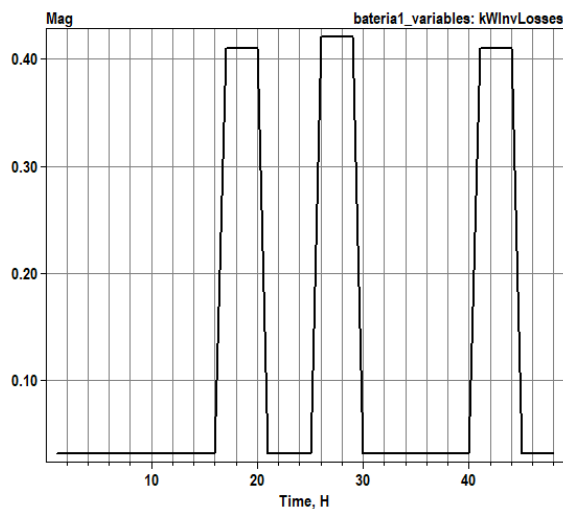
Nesse caso, tem-se uma descarga de 5 kW, representando cerca de 33,3% da capacidade nominal de 15 kW, o qual resulta em uma eficiência de, aproximadamente, 91%, de acordo com a curva de eficiência, apresentado na figura 30.

Figura 30 – Curva de eficiência do inversor



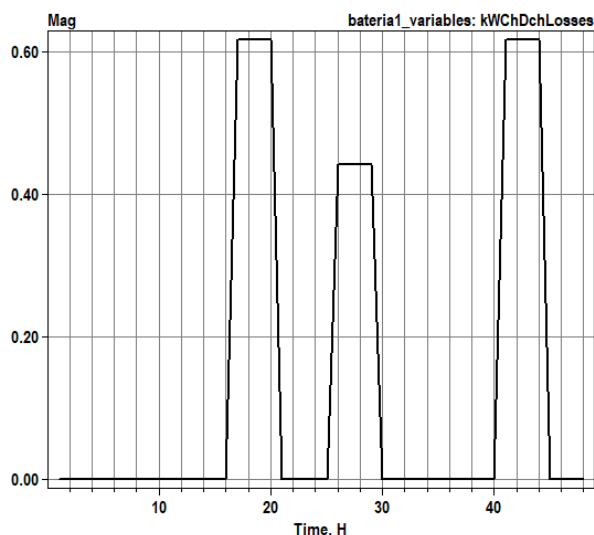
A figura 31 mostra essa perda no processo do inversor, tais perdas impactam diretamente na quantidade final de energia que é injetada na rede durante a descarga ou retirada durante o carregamento, o qual pode ser vista na figura 20. Porém, há outras fontes de perdas que podem impactam esse desempenho do veículo elétrico.

Figura 31 – Gráfico da perda de kW do inversor



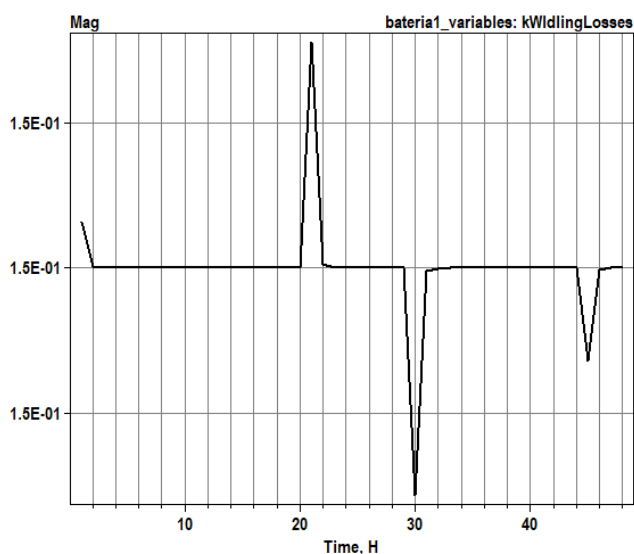
A figura 32 ilustra as perdas de potência associadas aos processos de descarga e recarga do veículo elétrico, os quais representam perdas devido à resistência interna e possíveis dissipações de energia durante o processo. No momento de descarga, a perda atinge valores próximos de 0,6 kW e, no momento de recarga, alcança valores próximos de 0,4 kW.

Figura 32 – Gráfico da perda de kW em momento de descarga e recarga



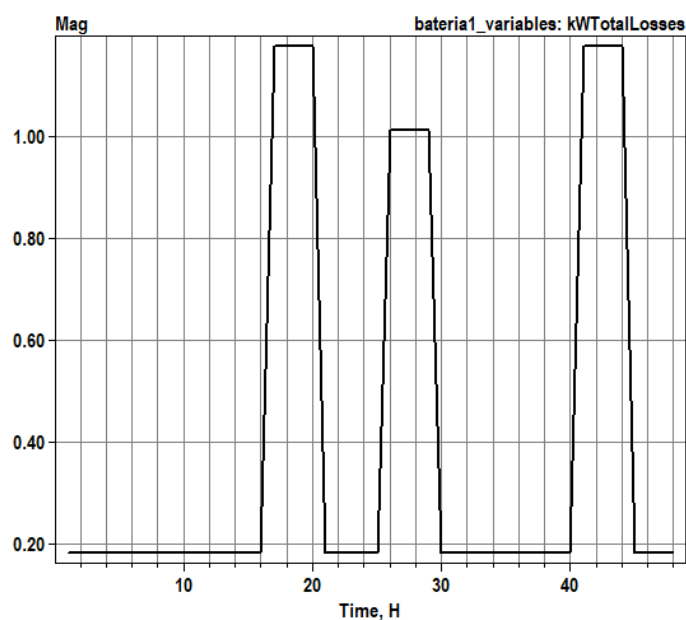
A figura 33 apresenta as perdas de inatividade, que ocorrem quando o sistema está em estado ocioso, ou seja, quando a bateria não está em operação ativa de carregamento ou descarregamento. Essas perdas de inatividade geralmente se devem a consumos de componentes eletrônicos essenciais e à manutenção de circuitos ativos para monitoramento e controle.

Figura 33 – Gráfico da perda de kW em momento inatividade



Por fim, A figura 34 representa a soma de todas essas perdas, as quais afetam diretamente a eficiência do processo de V2G e da recarga do veículo elétrico.

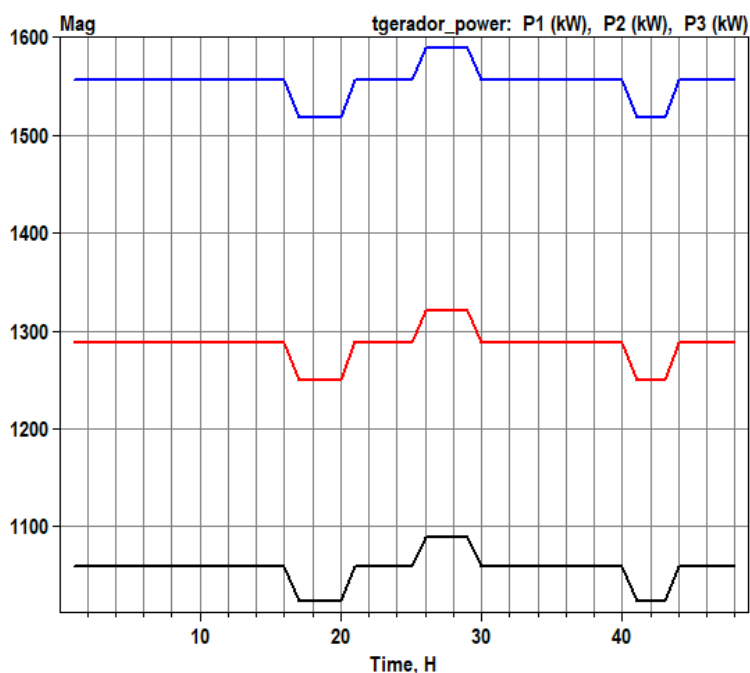
Figura 34 – Gráfico da perda total de kW



4.3. Cenário 2

O cenário 2 foi adotado as mesmas características do cenário anterior, em que o momento de injeção de energia dos veículos elétricos ocorra no horário das 17h às 20h, período considerado de alta demanda, e o momento de carregamento ocorra no horário das 02h às 05h, turno considerado de baixa demanda.

Nesse cenário, foi inserido 5 veículos com capacidade 40 kWh em cada um dos barramentos 634, 680, 675 e 632. Logo, nesse caso será feito o mesmo ponto operativo com uma maior quantidade de carros conectados ao sistema.

Figura 35 – Gráfico da potência ao longo do tempo transformador do gerador

Na figura 35, é possível averiguar que as oscilações do transformador antes da barra 650 nos momentos de injeção e recarga ficaram maiores. O aumento da quantidade de veículos no sistema gerou flutuações superiores ao cenário anterior na demanda de energia.

Logo, nesse ponto operativo, a primeiro momento essa injeção de energia de veículos para a rede fornece um alívio para o gerador, visto que a potência requisitada pela rede diminui. No momento de recarga do veículo, a demanda de potência aumenta consideravelmente, em que o gerador precisa produzir mais potência para atender ao consumo adicional dos veículos em recarga.

Tabela 17 – Tensão dos barramentos

| Veículo | inativo | injetando energia | carregando |
|-------------------|----------------|--------------------------|-------------------|
| Barramento | p.u. | | |
| 650 | 0.9999 | 1 | 1 |
| 633 | 1.018 | 1.019 | 1.017 |
| 634 | 0.9975 | 0.9988 | 0.9964 |
| 632 | 1.021 | 1.021 | 1.02 |
| 675 | 0.9985 | 0.9995 | 0.9977 |
| 680 | 1.001 | 1.001 | 0.9998 |

| | | | |
|------------|--------|--------|--------|
| 671 | 1.001 | 1.001 | 0.9999 |
| 645 | 1.016 | 1.017 | 1.016 |
| 646 | 1.016 | 1.016 | 1.015 |
| 692 | 1.001 | 1.001 | 0.9999 |
| 611 | 0.9592 | 0.9603 | 0.9582 |
| 652 | 0.979 | 0.9802 | 0.978 |
| 670 | 1.013 | 1.014 | 1.013 |
| 684 | 0.9846 | 0.9858 | 0.9836 |

Analisando a tabela 17, o aumento do número de veículos elétricos no sistema gerou um aumento nos valores de tensão nos barramentos no momento de injeção de energia, e uma queda de tensão nas barras no momento de carregamento desses veículos. Esse fenômeno é especialmente perceptível nas barras 634, 684, 675 e 611, porém barras como 632 e 680 começam a apresentar variações leves.

Tabela 18 – Corrente nas linhas com veículo inativo

| Elemento | I | Normal (%) | Emergência (%) |
|-------------|---------|------------|----------------|
| LINE,632670 | 391,5 | 120,33 | 80,22 |
| LINE,670671 | 360,23 | 118,31 | 78,87 |
| LINE,671680 | 0,33689 | 0,09 | 0,06 |
| LINE,632633 | 69,082 | 20,47 | 13,65 |
| LINE,632645 | 118,32 | 30,07 | 20,04 |
| LINE,645646 | 37,376 | 9,4 | 6,27 |
| LINE,692675 | 120,18 | 51,6 | 34,4 |
| LINE,671684 | 62,932 | 15,73 | 10,49 |
| LINE,684611 | 71,146 | 17,79 | 11,86 |
| LINE,684652 | 62,932 | 15,73 | 10,49 |
| LINE,671692 | 142,68 | 57,66 | 38,44 |

Tabela 19 – Corrente nas linhas com veículo carregando

| Elemento | I | Normal (%) | Emergência (%) |
|-------------|--------|------------|----------------|
| LINE,632670 | 397,76 | 121,91 | 81,27 |
| LINE,670671 | 366,5 | 119,89 | 79,92 |
| LINE,671680 | 34,744 | 0,9 | 0,6 |
| LINE,632633 | 71,732 | 21,16 | 14,1 |
| LINE,632645 | 118,26 | 30,06 | 20,04 |
| LINE,645646 | 37,358 | 9,4 | 6,26 |
| LINE,692675 | 123,39 | 52,46 | 34,97 |

| | | | |
|-------------|--------|-------|-------|
| LINE,671684 | 62,868 | 15,72 | 10,48 |
| LINE,684611 | 71,142 | 17,79 | 11,86 |
| LINE,684652 | 62,868 | 15,72 | 10,48 |
| LINE,671692 | 145,94 | 58,51 | 39,01 |

Tabela 20 – Corrente nas linhas com veículo injetando energia

| Elemento | I | Normal (%) | Emergência (%) |
|-------------|--------|------------|----------------|
| LINE,632670 | 383,93 | 118,43 | 78,95 |
| LINE,670671 | 352,65 | 116,41 | 77,6 |
| LINE,671680 | 34,646 | 0,9 | 0,6 |
| LINE,632633 | 65,937 | 19,65 | 13,1 |
| LINE,632645 | 118,39 | 30,07 | 20,05 |
| LINE,645646 | 37,397 | 9,4 | 6,27 |
| LINE,692675 | 116,29 | 50,56 | 33,71 |
| LINE,671684 | 63,009 | 15,75 | 10,5 |
| LINE,684611 | 71,15 | 17,79 | 11,86 |
| LINE,684652 | 63,009 | 15,75 | 10,5 |
| LINE,671692 | 138,73 | 56,64 | 37,76 |

As tabelas 18 até a 20 mostram o aumento da corrente no momento de carregamento e quando os veículos injetam energia na rede ocorre uma diminuição nas correntes. Comparado ao cenário anterior, a intensidade das correntes nas linhas foi maior nas linhas 632-670, 671-680, 632-633, 670-671, 692-675 e 671-692, as quais estão próximas de pontos de V2G. Além disso, as quedas de corrente no momento de injeção também foram mais expressivas.

Nas figuras 36, 37, 38 e 39, é apresentado o comportamento da tensão e da corrente na barramentos os quais possuem as estações de recarga. Comparando os resultados dos dois cenários, nota-se que o cenário 2 apresenta uma intensidade maior nas variações de tensão e corrente. As diferenças de tensão entre as fases nos barramentos ocorrem devido à presença de cargas monofásicas e bifásicas, aliadas ao desbalanceamento característico das cargas no sistema IEEE 13 barras.

Figura 36 – Gráfico da tensão (esquerda) e corrente (direita) ao longo do tempo na barra 634

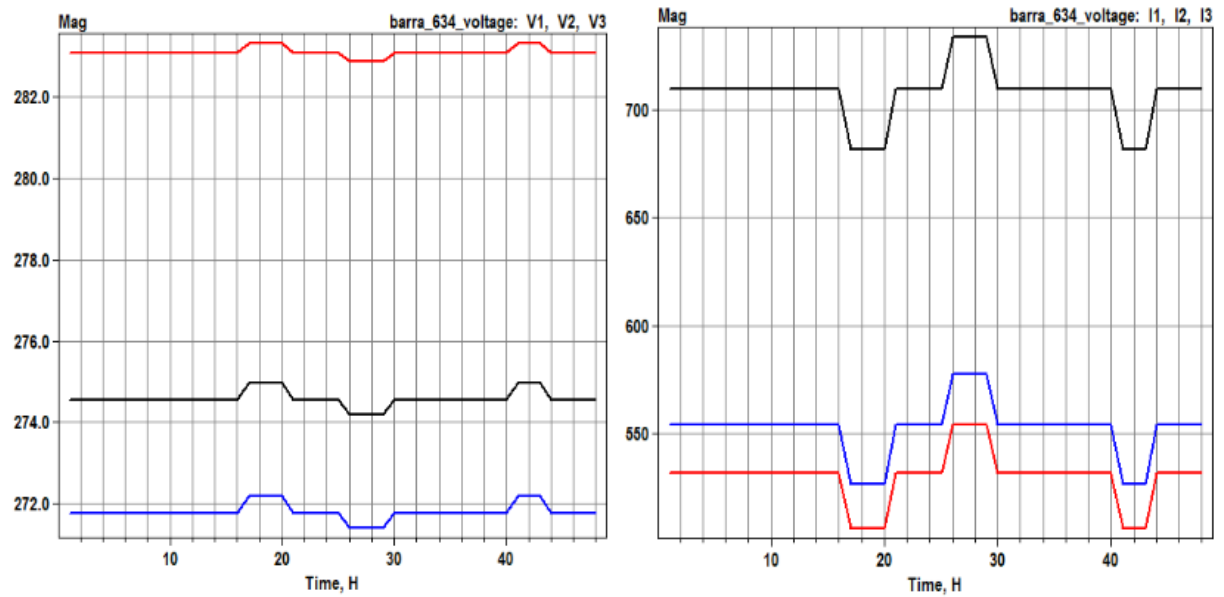


Figura 37 – Gráfico da tensão (esquerda) e corrente (direita) ao longo do tempo na barra 680

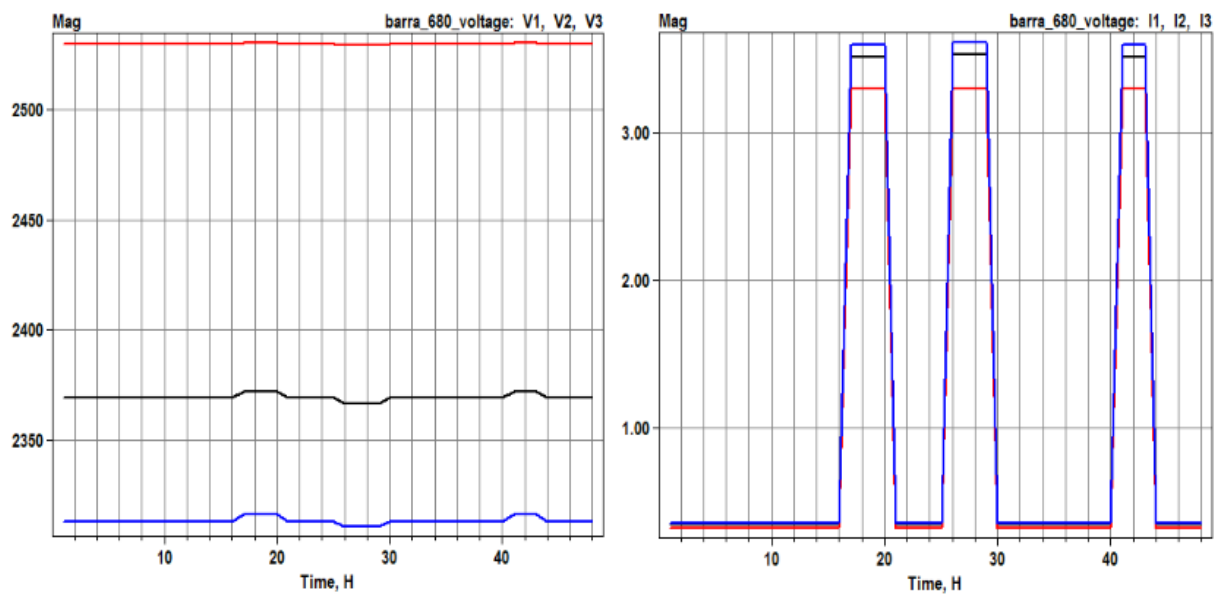


Figura 38 – Gráfico da tensão (esquerda) e corrente (direita) ao longo do tempo na barra 675

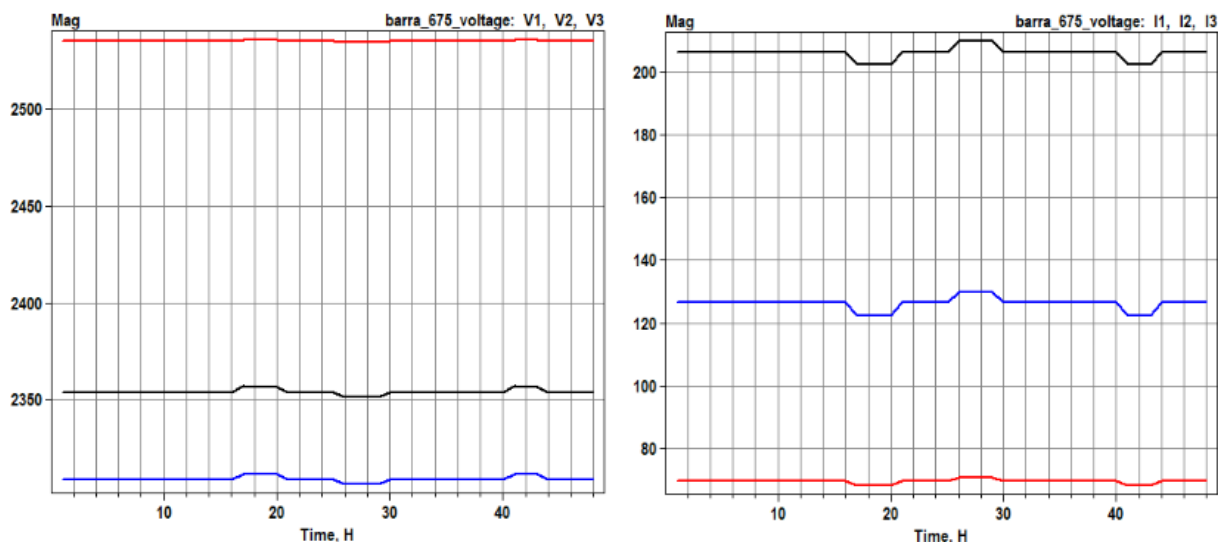
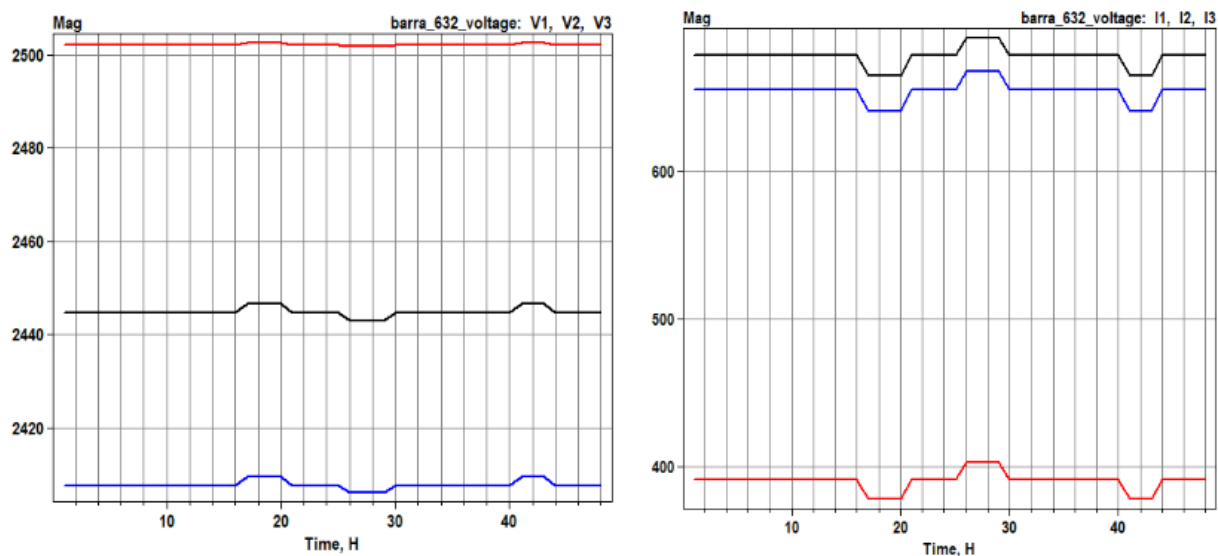


Figura 39 – Gráfico da tensão (esquerda) e corrente (direita) ao longo do tempo na barra 632

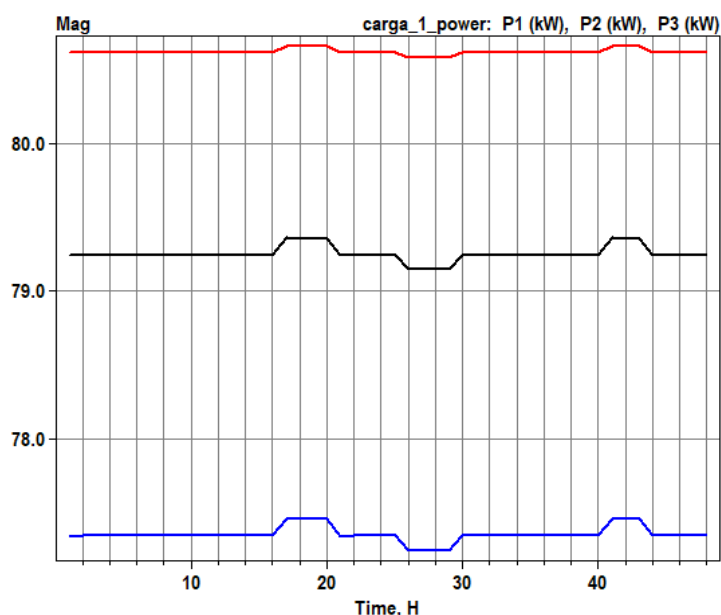


Na figura 40, é mostrado o comportamento da carga quando relacionado com a tecnologia V2G dos veículos elétricos nesse modo operativo específico. No primeiro momento, em que os carros estão carregados e fornecendo energia ativa, a carga tem um aumento na sua potência ativa, afetando o equilíbrio da rede elétrica. Esse fato ocorre por causa que a carga opera em ponto operativo constante, em que a potência ativa total na rede é ajustada devido à injeção do veículo, gerando essa resposta da carga. Além disso, é

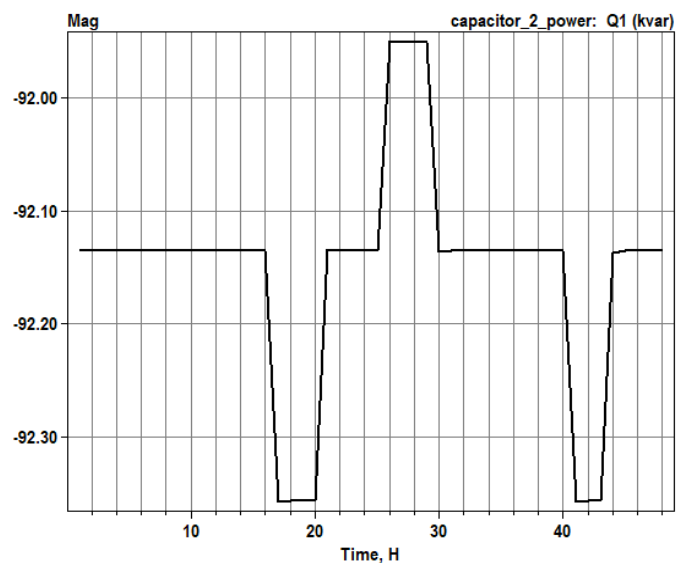
possível que a injeção repentina de energia cause essas flutuações, se a rede não estiver preparada para lidar com essa contribuição adicional.

Quando o veículo recarrega, o sistema tem um aumento de demanda de energia, diminuindo a quantidade de potência ativa que as cargas já existentes consumiam. Esse fato ocorre, pois, a rede reduz a demanda da carga para acomodar essa nova demanda, afim de equilibrar a distribuição de energia. Logo, verifica-se uma redução temporária da potência ativa de outras cargas para acomodar o carregamento do veículo elétrico.

Figura 40 – Gráfico da potência ao longo do tempo na carga do barramento 646



Na figura 41, tem-se a representação do comportamento do capacitor nesse cenário, em que se observa um leve aumento da potência reativa no momento de descarga, indicando que os capacitores fornecem mais potência reativa, pois a injeção de energia eleva a tensão fazendo com que o capacitor forneça mais potência reativa para o sistema, visto que está operando em um valor de tensão maior. Além disso, quando o veículo recarrega, o capacitor diminui a potência reativa, pois o carregamento do veículo gera uma diminuição da tensão fazendo com que o capacitor forneça menos potência reativa para o sistema, visto que está operando em um valor de tensão menor.

Figura 41 – Gráfico da potência ao longo do tempo do capacitor do barramento 611**Tabela 21** – Potência ativa e reativa com o veículo inativo

| Estado inicial | P1 kW | Q1 KVAr | P2 kW | Q2 KVAr | P3 kW | Q3 KVAr |
|----------------|----------|---------|--------|---------|----------|---------|
| linha 650-632 | 1.501,80 | 884,14 | 890,05 | 412,41 | 1.513,32 | 713,07 |
| linha 632-670 | 1.072,20 | 484,56 | 527,41 | 126,10 | 1.099,02 | 361,36 |
| linha 670-671 | 1.052,02 | 452,46 | 463,40 | 86,48 | 970,24 | 275,62 |
| linha 671-680 | 0,81 | 0,00 | 0,81 | 0,00 | 0,81 | 0,00 |
| linha 632-633 | 163,72 | 115,17 | 122,39 | 92,88 | 122,68 | 93,09 |
| linha 632-645 | 238,74 | 161,20 | 247,62 | 170,98 | 232,06 | 159,16 |
| linha 645-646 | 79,29 | 43,55 | 80,66 | 47,66 | 77,40 | 45,11 |
| linha 692-675 | 489,04 | -0,04 | 69,99 | -161,65 | 291,40 | 27,09 |
| linha 671-684 | 123,88 | 82,99 | 163,93 | -14,70 | - | - |
| linha 684-611 | 163,56 | -14,96 | - | - | - | - |
| linha 684-652 | 123,67 | 82,78 | - | - | - | - |
| linha 671-692 | 532,75 | 121,87 | 69,99 | -161,65 | 415,00 | 53,79 |

Tabela 22 – Potência ativa e reativa com o veículo injetando energia

| Descarga | P1 kW | Q1 KVAr | P2 kW | Q2 KVAr | P3 kW | Q3 KVAr |
|---------------|----------|---------|--------|---------|----------|---------|
| linha 650-632 | 1.463,53 | 877,04 | 853,88 | 409,32 | 1.474,24 | 706,71 |
| linha 632-670 | 1.053,73 | 482,48 | 509,20 | 125,30 | 1.080,25 | 359,37 |
| linha 670-671 | 1.033,74 | 451,02 | 445,11 | 85,87 | 951,79 | 274,21 |
| linha 671-680 | -8,33 | 0,01 | -8,33 | 0,01 | -8,33 | 0,01 |
| linha 632-633 | 154,35 | 114,77 | 113,10 | 92,60 | 113,36 | 92,79 |
| linha 632-645 | 239,11 | 161,47 | 247,72 | 171,04 | 232,42 | 159,38 |
| linha 645-646 | 79,40 | 43,63 | 80,70 | 47,68 | 77,52 | 45,16 |
| linha 692-675 | 479,79 | -0,62 | 60,90 | -161,75 | 282,23 | 26,61 |
| linha 671-684 | 124,18 | 83,19 | 164,13 | -14,83 | - | - |
| linha 684-611 | 163,76 | -15,09 | - | - | - | - |
| linha 684-652 | 123,97 | 82,98 | - | - | - | - |
| linha 671-692 | 523,56 | 121,44 | 60,90 | -161,75 | 405,97 | 53,34 |

Tabela 23 – Potência ativa e reativa no momento de recarga do veículo elétrico

| Recarga | P1 kW | Q1 KVAr | P2 kW | Q2 KVAr | P3 kW | Q3 KVAr |
|---------------|----------|---------|--------|---------|----------|---------|
| linha 650-632 | 1.533,37 | 890,17 | 919,86 | 415,11 | 1.545,56 | 718,52 |
| linha 632-670 | 1.087,43 | 486,35 | 542,41 | 126,80 | 1.114,49 | 363,06 |
| linha 670-671 | 1.067,10 | 453,70 | 478,46 | 87,03 | 985,45 | 276,85 |
| linha 671-680 | 8,34 | 0,01 | 8,34 | 0,01 | 8,34 | 0,01 |
| linha 632-633 | 171,44 | 115,52 | 130,05 | 93,12 | 130,37 | 93,35 |
| linha 632-645 | 238,43 | 160,98 | 247,54 | 170,92 | 231,77 | 158,97 |
| linha 645-646 | 79,19 | 43,49 | 80,63 | 47,64 | 77,30 | 45,07 |
| linha 692-675 | 496,66 | 0,46 | 77,48 | -161,55 | 298,97 | 27,51 |
| linha 671-684 | 123,63 | 82,82 | 163,77 | -14,59 | - | - |
| linha 684-611 | 163,40 | -14,85 | - | - | - | - |
| linha 684-652 | 123,42 | 82,61 | - | - | - | - |
| linha 671-692 | 540,32 | 122,24 | 77,48 | -161,55 | 422,44 | 54,18 |

Tabela 24 – Comparativos em percentual da variação do estado inicial com o momento de recarga

| Recarga | P1 kW | Q1 KVAr | P2 kW | Q2 KVAr | P3 kW | Q3 KVAr |
|---------------|---------|-----------|---------|----------|---------|-----------|
| linha 650-632 | 2,10% | 0,68% | 3,35% | 0,66% | 2,13% | 0,76% |
| linha 632-670 | 1,42% | 0,37% | 2,85% | 0,56% | 1,41% | 0,47% |
| linha 670-671 | 1,43% | 0,27% | 3,25% | 0,63% | 1,57% | 0,44% |
| linha 671-680 | 930,78% | -1000,00% | 930,66% | -800,00% | 930,78% | -1000,00% |
| linha 632-633 | 4,72% | 0,30% | 6,26% | 0,26% | 6,26% | 0,28% |
| linha 632-645 | -0,13% | -0,14% | -0,03% | -0,03% | -0,13% | -0,12% |
| linha 645-646 | -0,12% | -0,15% | -0,04% | -0,04% | -0,13% | -0,10% |
| linha 692-675 | 1,56% | -1380,56% | 10,70% | -0,06% | 2,60% | 1,55% |
| linha 671-684 | -0,20% | -0,20% | -0,10% | -0,73% | - | - |
| linha 684-611 | -0,10% | -0,72% | - | - | - | - |
| linha 684-652 | -0,20% | -0,20% | - | - | - | - |
| linha 671-692 | 1,42% | 0,31% | 10,70% | -0,06% | 1,79% | 0,72% |

Tabela 25 – Comparativos em percentual da variação do estado inicial com o momento injeção de energia

| Descarga | P1 kW | Q1 KVAr | P2 kW | Q2 KVAr | P3 kW | Q3 KVAr |
|---------------|--------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|
| linha 650-632 | -2,55% | -0,80% | -4,06% | -0,75% | -2,58% | -0,89% |
| linha 632-670 | -1,72% | -0,43% | -3,45% | -0,63% | -1,71% | -0,55% |
| linha 670-671 | -1,74% | -0,32% | -3,95% | -0,71% | -1,90% | -0,51% |
| linha 671-680 | -1129% | -1000,00% | -1129,54% | -800,00% | -1129,4% | -1000,00% |
| linha 632-633 | -5,72% | -0,35% | -7,59% | -0,30% | -7,60% | -0,32% |
| linha 632-645 | 0,16% | 0,17% | 0,04% | 0,04% | 0,15% | 0,14% |
| linha 645-646 | 0,14% | 0,18% | 0,05% | 0,05% | 0,15% | 0,12% |
| linha 692-675 | -1,89% | 1611,11% | -12,99% | 0,06% | -3,15% | -1,78% |
| linha 671-684 | 0,24% | 0,24% | 0,12% | 0,88% | - | - |
| linha 684-611 | 0,12% | 0,86% | - | - | - | - |
| linha 684-652 | 0,24% | 0,24% | - | - | - | - |
| linha 671-692 | -1,72% | -0,36% | -12,99% | 0,06% | -2,18% | -0,83% |

Da tabela 21 até a tabela 25, são mostrados os resultados numéricos de potência ativa e reativa das linhas do sistema em cada momento simulado. Analisando todos os casos, é possível concluir que as linhas de maior variação envolvem barras que estão perto da arquitetura V2G. A linha 632-633 e linha 692-675 tiveram variações bruscas, uma vez que, em momentos de descarga de energia do veículo elétrico, essas linhas necessitam de menos potência advinda do gerador, visto que a arquitetura V2G supre bastante da demanda das cargas nessas linhas, outro fator que ajuda é a localização próxima dessa tecnologia.

Porém, essas linhas no momento de recarga, em que o veículo elétrico demanda energia, necessitam de bastante energia para conseguir suprir toda a demanda. Vale ressaltar que esse caso é apenas para exemplificar e mostrar o funcionamento do G2V, os casos reais as cargas são variáveis e a arquitetura V2G visa auxiliar a rede elétrica em momentos de alta demanda, evitando a sobrecarga no gerador.

A linha 671-680 apresentou uma alta variação percentual em sua potência pois não havia nenhuma carga conectada ao barramento 680. A única conexão era com o carro elétrico, que estava injetando ou retirando energia da rede, causando essas variações percentuais.

As linhas que envolvem as barras 684 e 645 não tiveram uma grande variação pois está distante das estações de recarga, logo é menos impactada pela injeção de energia e pelo carregamento dos veículos elétricos nos outros barramentos.

4.3.1. Perdas em momento de descarga e recarga

Nesse caso, como ocorreu a inserção de 5 veículos elétricos, observa-se um aumento proporcional das perdas no sistema. Logo, à medida que a quantidade de veículos conectados aumenta, há um crescimento correspondente nas potências de perda que ocorrem no sistema durante as operações de carga e descarga. Tal fato pode ser visto nas figuras 42, 43, 44 e 45.

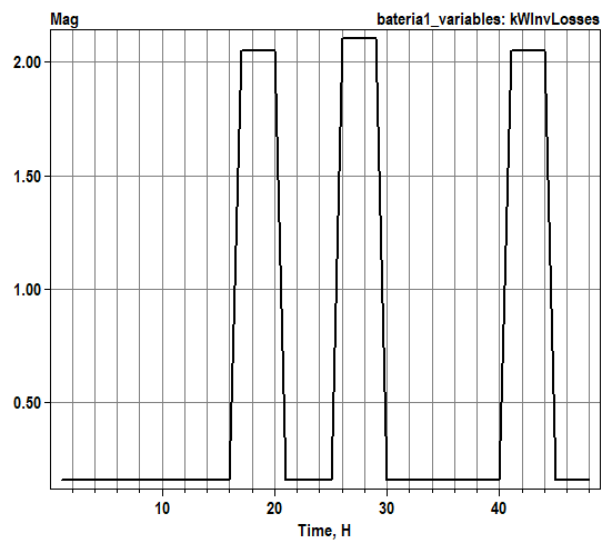
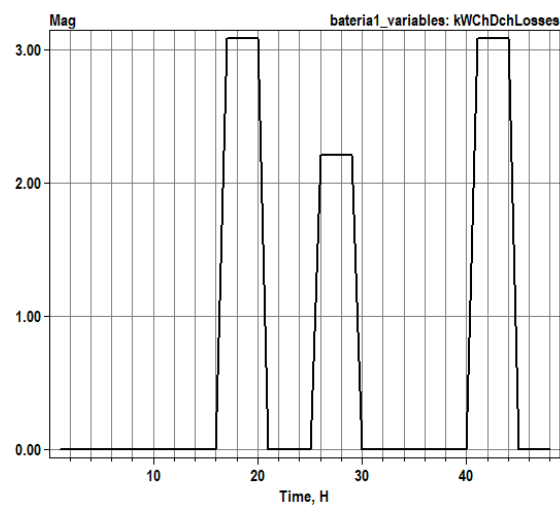
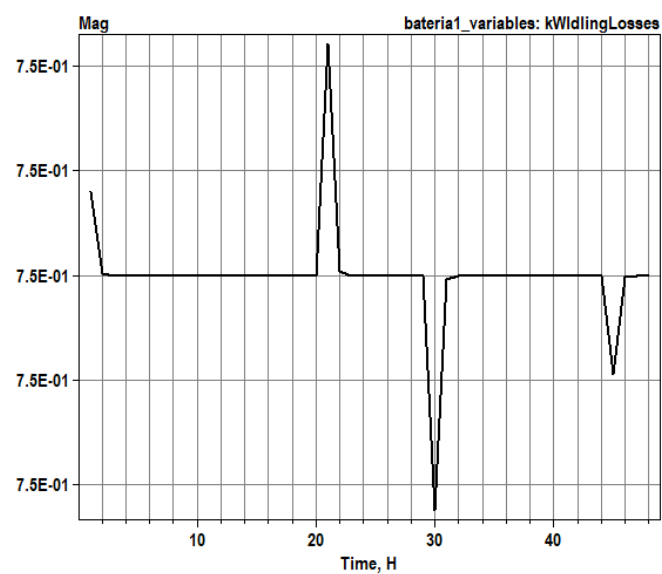
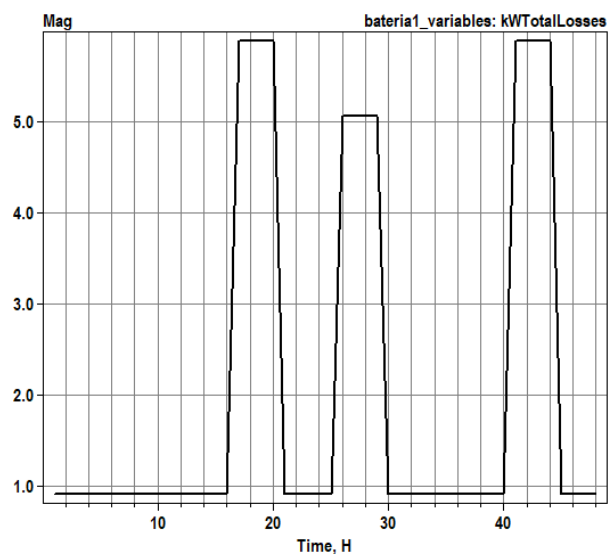
Figura 42 – Gráfico da perda de kW do inversor**Figura 43** – Gráfico da perda de kW em momento de descarga e recarga (kWChDchLosses)**Figura 44** – Gráfico da perda de kW em momento inatividade (kWIdleLosses)

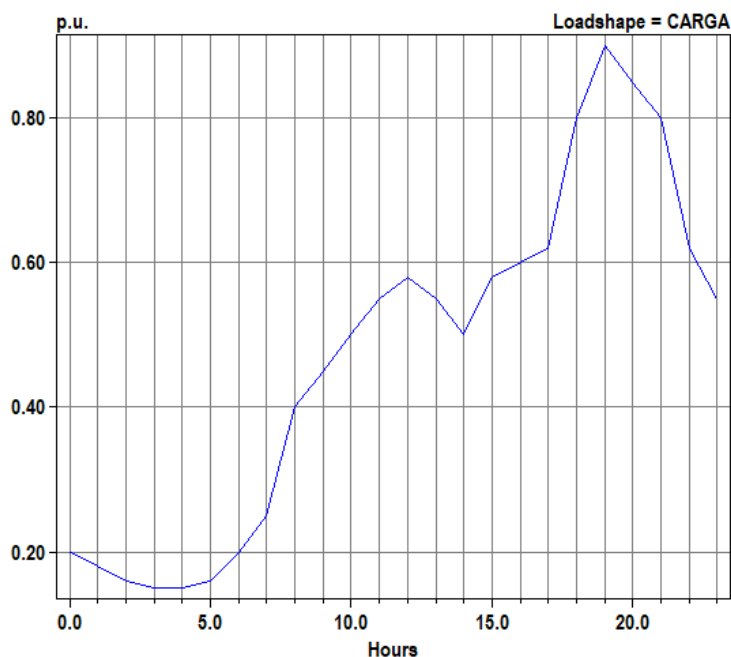
Figura 45 – Gráfico da perda total de kW

4.4. Cenário 3

O cenário 3 foi estabelecido que o momento de injeção de energia dos veículos elétricos ocorra no horário das 17h às 20h, período considerado de alta demanda, e o momento de carregamento ocorra no horário das 02h às 05h, turno considerado de baixa demanda. Porém, diferentemente dos dois cenários anteriores, nesse caso foi implementada uma curva de carga para simular um caso mais realista da demanda de carga ao longo do dia, sendo um ponto operativo diferente dos cenários 1 e 2.

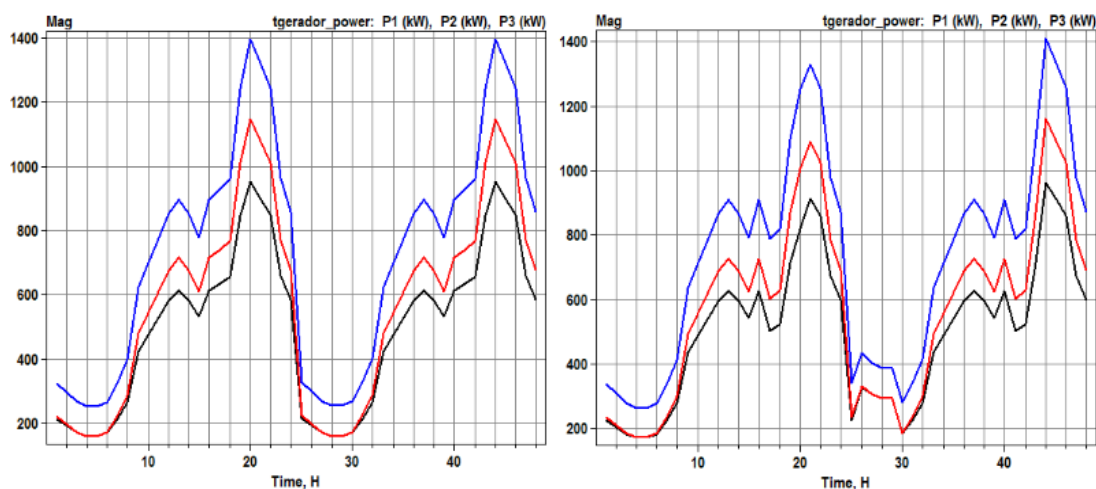
Nesse cenário, foi inserido 20 veículos com capacidade 40 kWh em cada um dos barramentos 634, 680, 675 e 632. Logo, tem-se uma capacidade de 800 kWh e uma potência de saída de 100 kW em cada uma das barras.

Na figura 46, é possível analisar o comportamento da carga ao longo das 24 horas do dia. Nesse caso, foi adotado um modelo de horário em que se tem uma baixa demanda durante a madrugada e o início da manhã, a qual se eleva até o momento de alta demanda das 18 até 21 horas, representando um perfil de consumo residencial.

Figura 46 – Comportamento das cargas

A mudança do comportamento da carga gerou diversas mudanças na demanda do gerador, visto que as cargas necessitam de diferentes quantidades de energia em momentos específicos. Nesse sentido, durante os horários de alta demanda, os geradores podem ser mais solicitados para fornecer uma quantidade maior de energia. Nos horários de baixa demanda, eles podem operar com capacidade reduzida.

Figura 47 – Gráfico do transformador antes da barra 650 sem V2G (esquerda) e com V2G (direita)

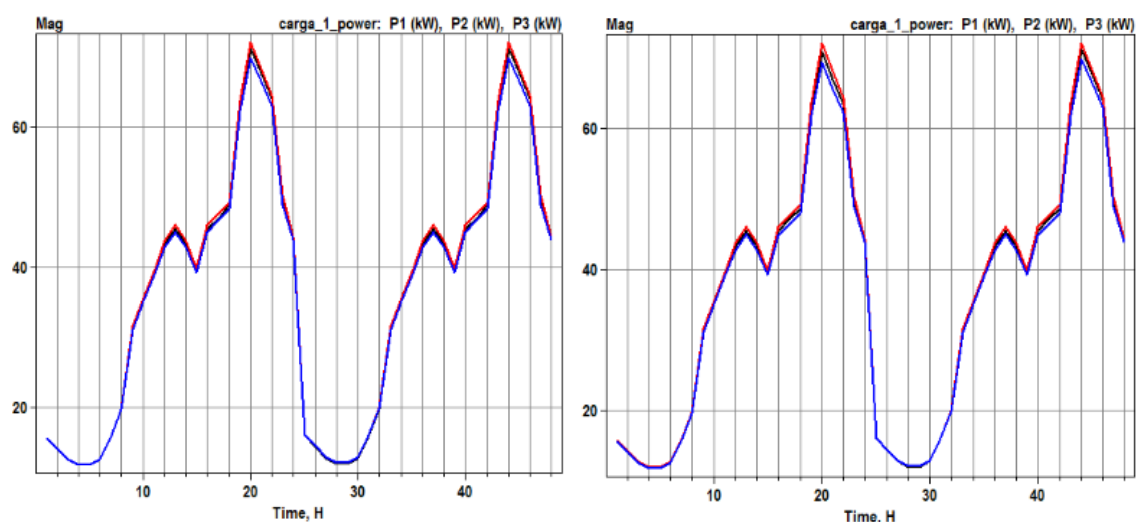


Na figura 47, é possível comparar que mudanças na implementação do V2G ocorre ao transformador antes da barra 650 do sistema em estudo. Nesse

caso, nota-se que houve uma diminuição da magnitude do pico de energia, concluindo que essa arquitetura alivia a pressão sobre o gerador durante os horários de alta demanda.

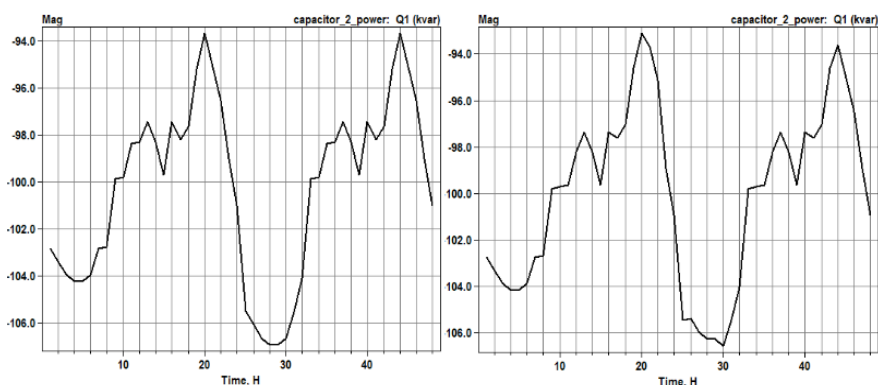
Ademais, no momento de baixa demanda, ocorreu um leve aumento da potência do gerador, visto que é o horário em que os veículos elétricos demandam energia na rede. Esse controle de injeção e retirada de energia da rede pode ajudar a estabilizar a rede elétrica e melhorar a resiliência e confiabilidade.

Figura 48 – Gráfico da carga do barramento 646 sem V2G (esquerda) e com V2G (direita)



Na figura 48, nota-se que, praticamente, não ocorre nenhuma mudança no comportamento da carga com a inserção do V2G, pois o gerador e veículo elétrico estão em equilíbrio. Logo, o sistema elétrico está operando em um estado de equilíbrio entre a demanda total de energia e geração de energia, mesmo com a introdução do V2G.

Figura 49 – Gráfico do capacitor do barramento 611 sem V2G (esquerda) e com V2G (direita)



Na figura 49, observa-se uma leve variação da potência reativa no momento de descarga e recarga, indicando que os capacitores sofrem uma leve influência dos veículos elétricos. Quando o veículo recarrega a potência reativa do capacitor diminui levemente e quando carro injeta energia a potência reativa aumenta levemente.

Nas figuras 50 e 51, nota-se a influência dos veículos elétricos sobre a tensão e corrente do barramento 634. No primeiro momento ocorre injeção de energia, em que é marcada pela elevação da tensão de uma fase e redução de outra, além disso ocorre a diminuição de corrente. Posteriormente ocorre o carregamento, em que é notório uma redução de tensão de uma fase e elevação de outra novamente, e um aumento da corrente. A tensão apresenta esse comportamento por causa de cargas monofásicas e bifásicas, aliadas ao desbalanceamento característico dessas cargas juntamente com a influência do V2G.

Figura 50 – Gráfico da tensão do barramento 634 sem V2G (esquerda) e com V2G (direita)

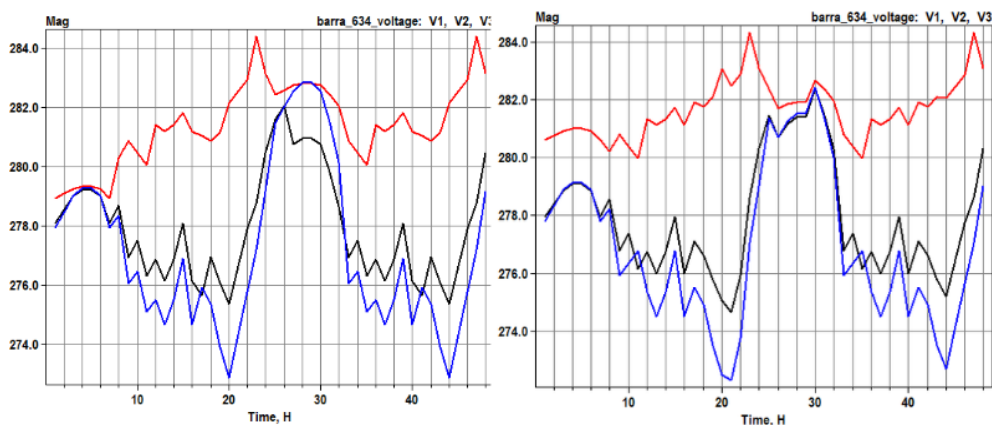
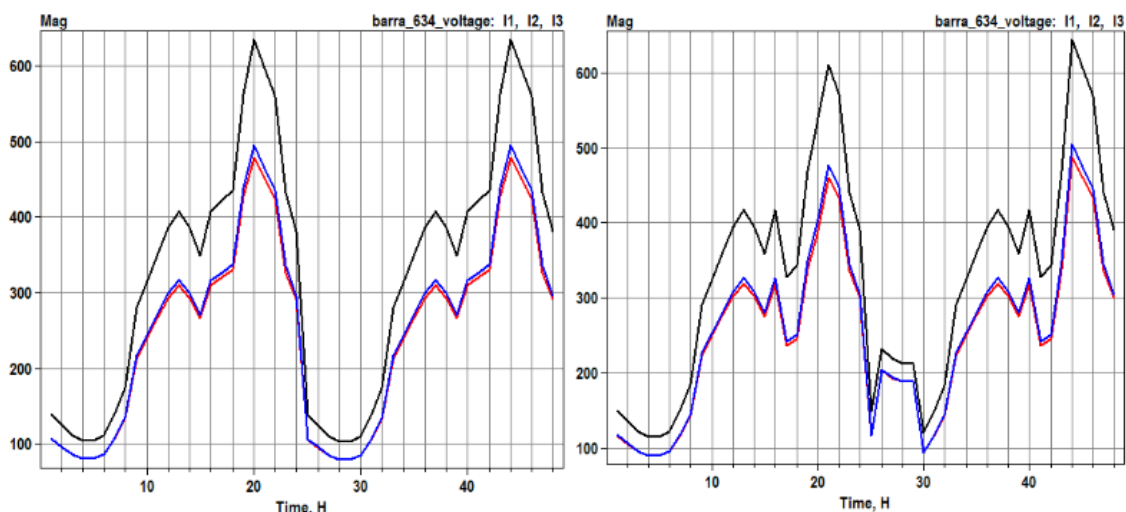
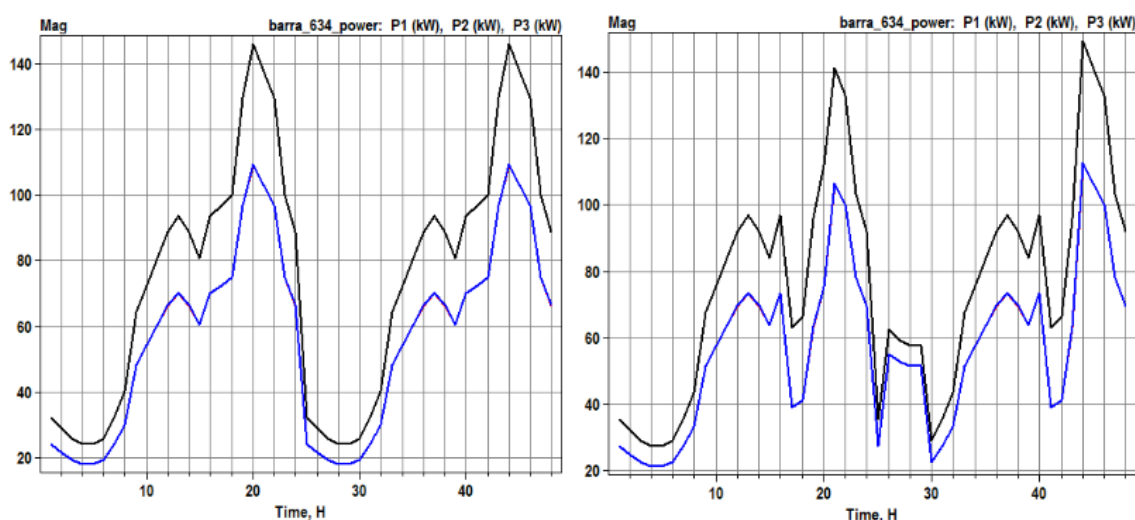


Figura 51 – Gráfico da corrente do barramento 634 sem V2G (esquerda) e com V2G (direita)



A figura 52 mostra a potência ativa do barramento 634, o momento de injeção de energia apresenta uma redução na potência ativa do barramento, pois o veículo está fornecendo energia para a rede, aliviando a demanda de potência que o barramento necessita para suprir sua demanda. No momento de recarga do veículo elétrico, observa-se um aumento na potência ativa do barramento, ocasionado pelo carregamento do veículo que aumenta a demanda de potência ativa no barramento.

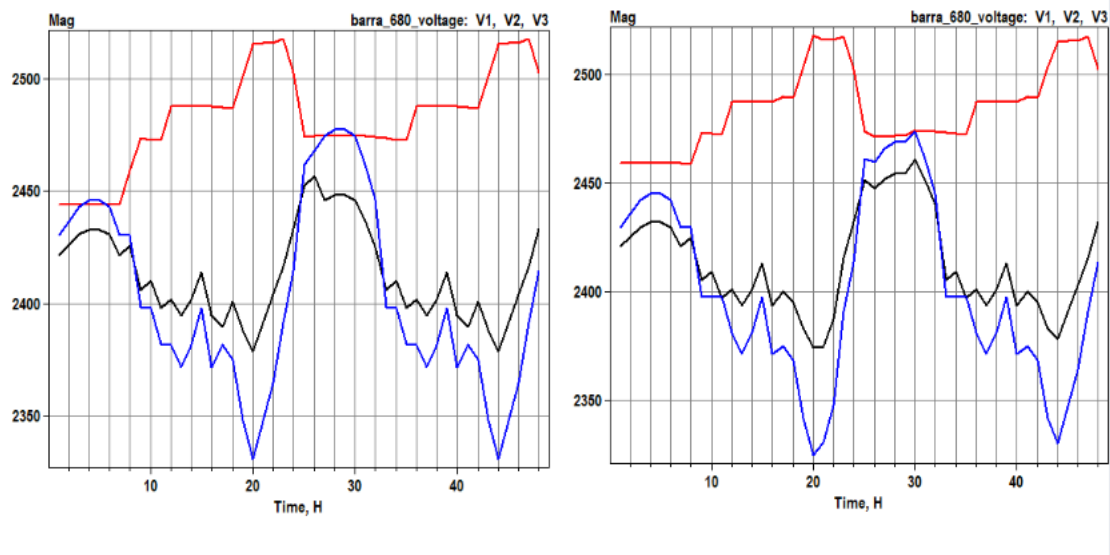
Figura 52 – Gráfico da potência do barramento 634 sem V2G (esquerda) e com V2G (direita)



A figura 53 mostra a tensão do barramento 680. Nesse caso, é possível analisar que na primeira fase praticamente não ocorre variação de tensão, porém a segunda e terceira fase apresentam variações. No momento da

injeção de energia há um aumento de tensão na terceira fase e uma diminuição da segunda. Além disso, no momento de carregamento do veículo ocorre novamente um leve aumento na tensão da terceira fase e uma diminuição na segunda.

Figura 53 – Gráfico da tensão do barramento 680 sem V2G (esquerda) e com V2G (direita)



As figuras 54 e 55 é possível observar a corrente e potência ativa da barra 680, respectivamente. Como já foi mencionado, a barra 680 não apresenta nenhuma carga conectada, logo devido a estação de recarga surge as variações de corrente e potência, as quais anteriormente eram praticamente nulas.

Figura 54 – Gráfico da corrente do barramento 680 sem V2G (esquerda) e com V2G (direita)

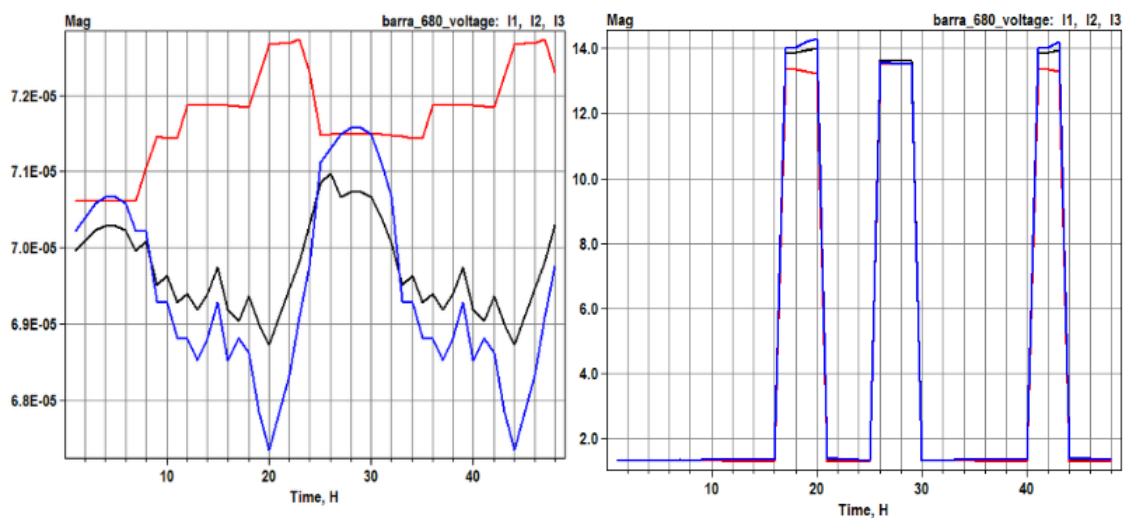
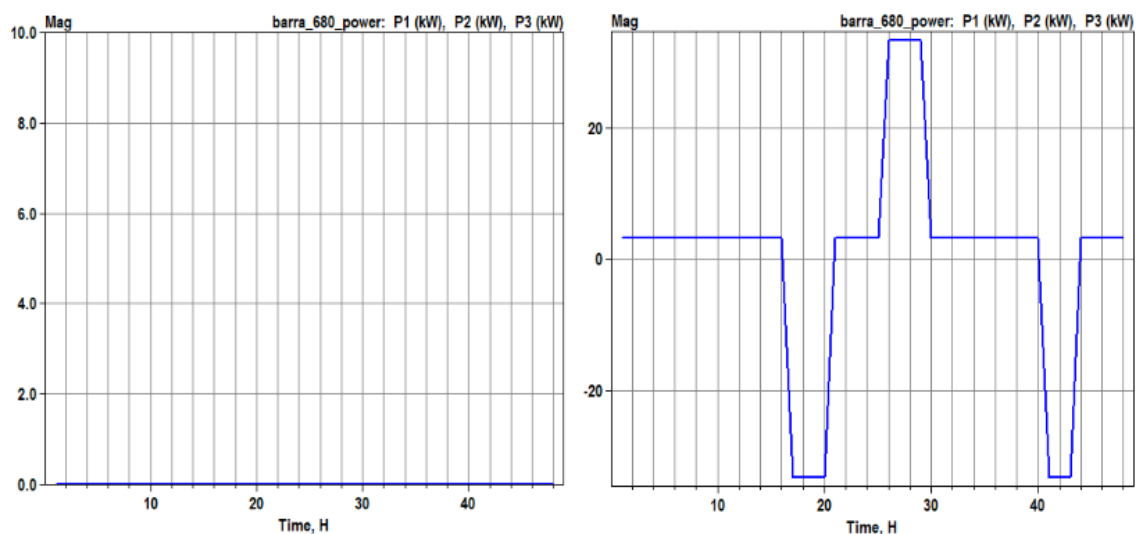
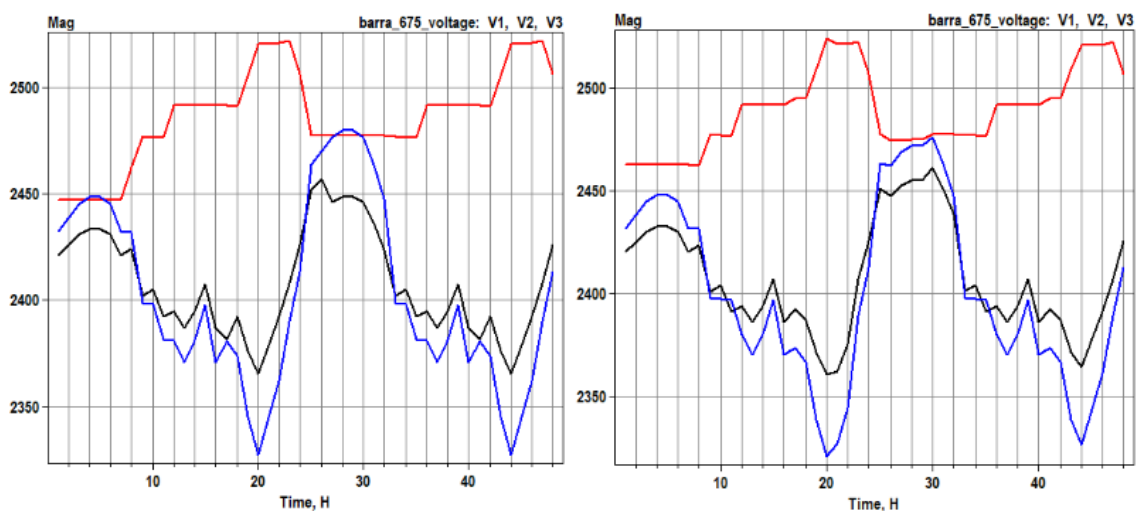


Figura 55 – Gráfico da potência do barramento 680 sem V2G (esquerda) e com V2G (direita)



A figura 56 mostra a tensão do barramento 675, em que apresenta um comportamento similar ao gráfico de tensão da barra 680. Durante a injeção de energia, ocorre um aumento de tensão na terceira fase e uma leve redução na segunda. Na recarga do veículo, observa-se novamente um aumento na tensão da terceira fase e uma diminuição na segunda.

Figura 56 – Gráfico da tensão do barramento 675 sem V2G (esquerda) e com V2G (direita)



As figuras 57 e 58 é possível observar a corrente e potência ativa da barra 675, durante a injeção de energia ocorre a diminuição da corrente e diminuição da potência ativa. Posteriormente, durante o carregamento ocorre um aumento da corrente e da potência.

Figura 57 – Gráfico da corrente do barramento 675 sem V2G (esquerda) e com V2G (direita)

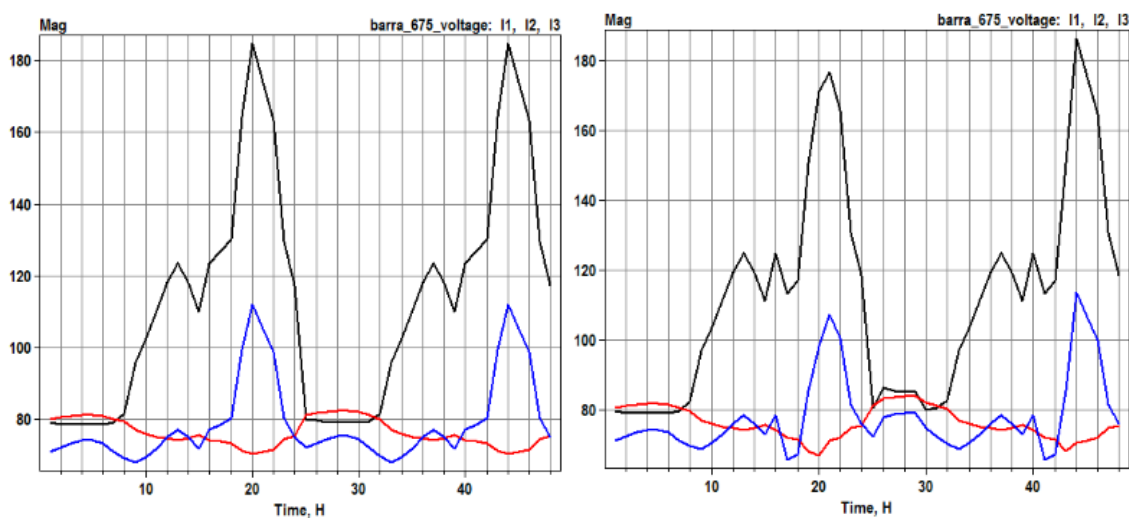
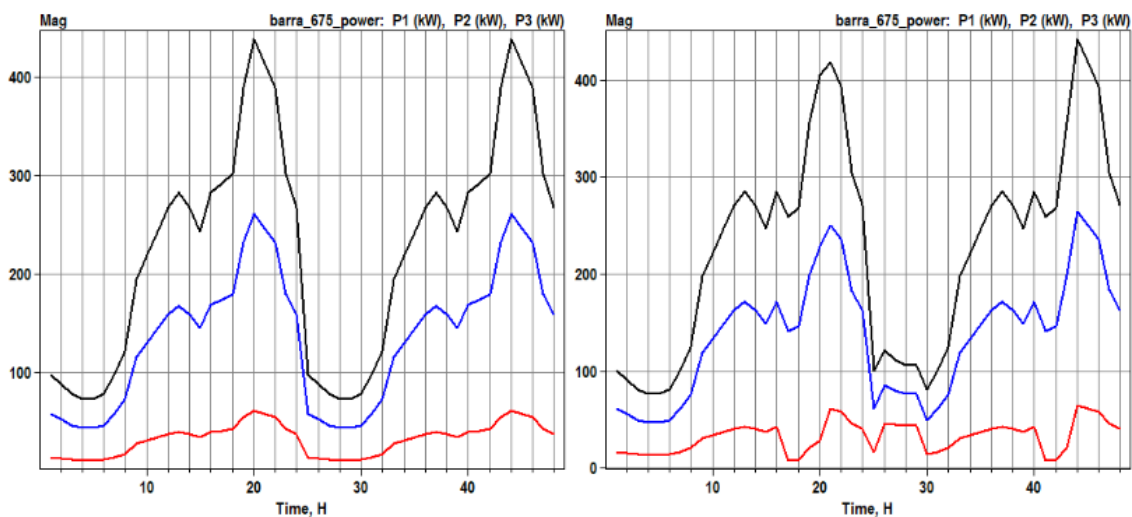
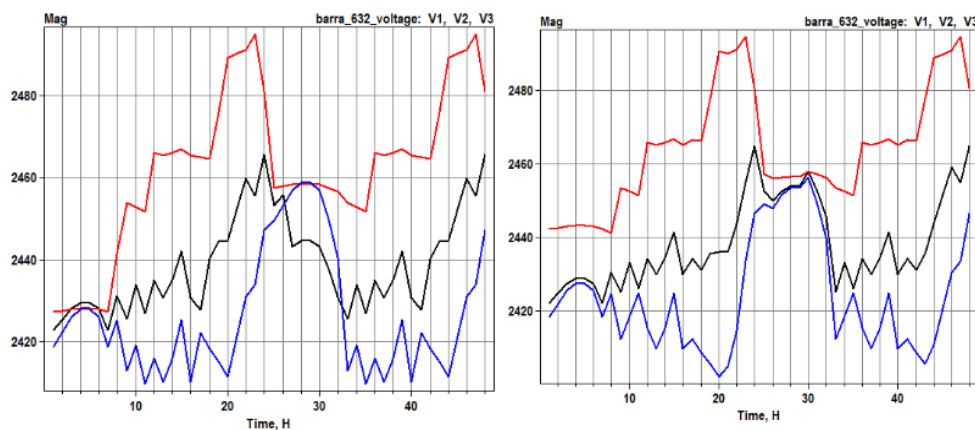


Figura 58 – Gráfico da potência do barramento 675 sem V2G (esquerda) e com V2G (direita)



A figura 59 apresenta um comportamento da tensão do barramento 632, similar às barras 675, 634 e 680. Tendo variações diferentes em cada fase, em que a primeira sofre leves variações, enquanto a segunda e terceira fase quando há uma redução de tensão em uma das fases, a outra apresenta um aumento correspondente.

Figura 59 – Gráfico da tensão do barramento 632 sem V2G (esquerda) e com V2G (direita)



As figuras 60 e 61 apresenta o comportamento da corrente e da potência ativa da barra 632, o qual também é similar as barras 675 e 634. No período da injeção de energia, ocorre uma diminuição tanto da corrente quanto da potência ativa. No decorrer do carregamento, observa-se um aumento na corrente e na potência.

Figura 60 – Gráfico da corrente do barramento 632 sem V2G (esquerda) e com V2G (direita)

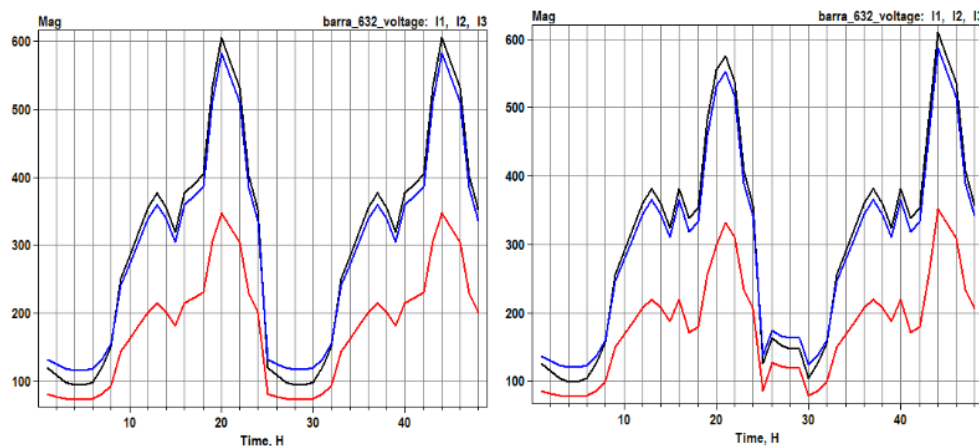
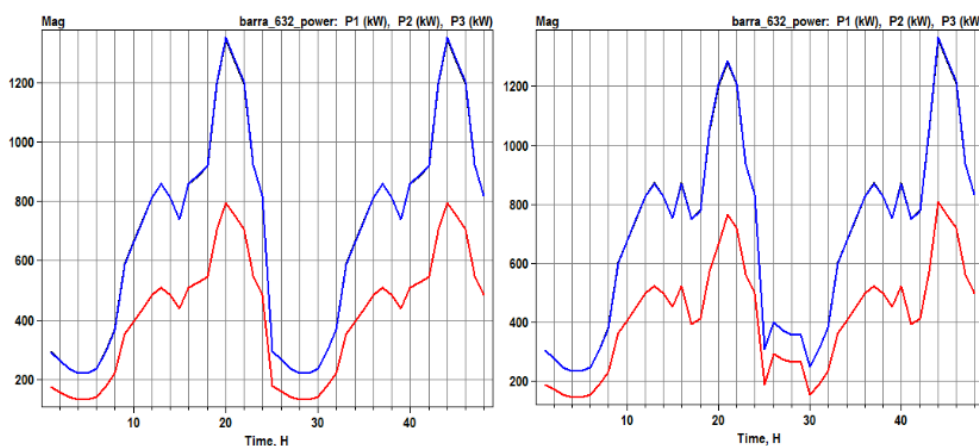


Figura 61 – Gráfico da potência do barramento 632 sem V2G (esquerda) e com V2G (direita)



4.5. Conclusão

A integração do *Vehicle-to-Grid* na rede elétrica mostrou-se promissora para diminuir a demanda do gerador e compensar as cargas locais e próximas. No primeiro cenário, onde havia apenas um veículo elétrico conectado aos barramentos 632, 675, 680 e 634, os parâmetros da rede mantiveram-se mais estáveis, com tensões e correntes com leves variações.

No segundo cenário, foi inserido 5 veículos elétricos em cada um dos barramentos já citados. Nesse sentido, tanto a recarga quanto a injeção de energia começaram a causar variações perceptíveis na rede, observou-se um flutuações nos parâmetros de tensão e corrente, ocorreu de forma mais intensa nos barramentos e linhas de transmissão próximos às estações de recarga, os quais são as barras 632, 675, 680 e 634.

Durante a injeção de energia, as tensões aumentaram e as correntes diminuíram, enquanto no carregamento, ocorreu o inverso, ou seja, as tensões caíram e as correntes aumentaram, impondo uma demanda adicional ao sistema. Além disso, esse momento de injeção reflete uma diminuição de potência do gerador e das barras as quais possuem as estações de recarga, visto que o sistema V2G auxilia a demanda das cargas, aliviando a geração de energia do gerador. Porém, no período de carregamento do veículo ocorre o aumento da demanda de energia das estações de recarga, em que resulta em um aumento da demanda de potência ao gerador e às linhas de distribuição.

No terceiro cenário, foi conectado 20 veículos elétricos em cada um dos barramentos 632, 675, 680 e 634. Contudo, diferentemente dos outros dois cenários, foi implementado um ponto operativo em que as cargas variavam sua demanda ao longo do dia. Nesse sentido, nota-se que as estações de recarga promovem também um alívio ao gerador no momento de alta demanda das cargas e, quando o sistema fica no momento de baixa demanda, ocorre o carregamento dos veículos para, dessa forma, não sobrecarregar o gerador com a demanda de energia.

A infraestrutura do V2G não gerou variações nas cargas do sistema, mas influenciou flutuações nos capacitores. Ademais, os parâmetros de tensão

tiveram baixa amplitude de variações, porém ocorreram de forma oposta entre fases, por exemplo uma fase ficava praticamente constante, enquanto as outras duas fases quando ocorria uma leve diminuição da tensão de uma fase gerava um aumento proporcional na outra. Esse fato deve ocorrer possivelmente por causa das cargas e seu comportamento variável ao longo do dia.

Logo, constata-se que o funcionamento do V2G na rede elétrica, indica que ele pode ser uma solução eficaz para gerenciar a demanda e melhorar a estabilidade da tensão em períodos de pico. Entretanto, essa injeção de energia será de maior proveito quando o sistema está com alta demanda de energia, para, dessa forma, auxiliar o gerador da rede. Além disso, o carregamento dos veículos também pode ser um fator de risco para o gerador quando feito em momentos de alta demanda com uma grande quantidade de carros conectados, sobrecarregando o gerador.

É necessário criar estratégias de controle para minimizar os prejuízos ao sistema e ao gerador, além de maximizar a eficiência, tanto durante o carregamento quanto a descarga dos veículos, garantindo uma integração harmoniosa e segura dos veículos elétricos na rede elétrica.

5. Considerações finais

A pesquisa teve como objetivo principal avaliar o desempenho da implementação da arquitetura *Vehicle-to-Grid* por meio das simulações no software *OpenDss*. Nesse sentido, sabe-se que a integração dessa tecnologia em qualquer sistema de distribuição, deve ser paulatina e cautelosa, visto que é necessário desenvolver uma regulamentação acerca da integração eficaz do V2G, abordando questões como padrões técnicos, tarifas de energia, retornos financeiros e protocolos de segurança.

Analisando os cenários simulados, nota-se que não ocorreram alterações significativas sobre a potência reativa. As alterações mais evidentes aconteceram com a potência ativa e alterações na tensão e corrente, as variações nesses parâmetros ocasionaram consequências diretas sobre o gerador, assim como sobre as linhas de distribuição por causa da arquitetura V2G.

Os cenários 1 e 2 simulados com ponto operativo de cargas constantes foi feita para demonstrar o efetivo efeito da arquitetura V2G sobre a estrutura da rede de distribuição. Logo, foi possível analisar como a injeção ou absorção de energia dos veículos elétricos impacta a estabilidade da rede, sem a interferência de flutuações de carga externas.

Além disso, no cenário 3 é possível constatar o ideal efeito dessa tecnologia na simulação com cargas variáveis, o qual temos apenas a influência direta no gerador do sistema, visto que as cargas ficam em equilíbrio mesmo com variações devido ao V2G.

Nesse caso, nos momentos de alta demanda de energia o gerador tem a colaboração dos veículos elétricos para atender esse consumo, e nos momentos de baixa demanda de energia, esses carros recarregam, visto que o gerador está com folga de geração. Concluindo que essa é uma eficiente forma de inserção dessa tecnologia para maximizar os benefícios da tecnologia, e minimizar seus possíveis impactos negativos, como a sobrecarga da rede.

5.1. Trabalhos Futuros

A tecnologia *Vehicle-to-Grid* ainda contém uma grande quantidade de possibilidades de pesquisas para o seu aprimoramento e desenvolvimento, a fim de encontrar uma aplicação segura na rede de distribuição de energia. Nesse sentido, há diversos temas os quais podem ser estudados como:

- A integração de V2G com fontes de energia renovável, como solar e eólica, para potencializar a utilização de energia limpa;
- O estudo e desenvolvimento de modelos de negócios para os proprietários de veículos elétricos, as concessionárias e os donos de eletropostos, identificando outras formas inovadoras de remuneração para essas pessoas;
- Explorar as possibilidades de expansão do V2G para outras áreas, como residências (*Vehicle-to-Home*), empresas (*Vehicle-to-Building*) e outros setores (*Vehicle-to-Everything*).

REFERÊNCIAS

AMARAL, Paulo. Carros elétricos | Quais são os tipos de conectores? 2022. Editado por Jones Oliveira. Disponível em: <https://canaltech.com.br/carros/carros-eletricos-tipos-conectores-209412/>.

Acesso em: 10 jun. 2023.

BERMÚDEZ-RODRÍGUEZ, Tatiana; CONSONI, Flávia Luciane. Uma abordagem da dinâmica do desenvolvimento científico e tecnológico das baterias lítio-íon para veículos elétricos. *Revista Brasileira de Inovação*, v. 19, 2021.

BOTSFORD, Charles; SZCZEPANEK, Adam. Fast charging vs. slow charging: Pros and cons for the new age of electric vehicles. In: *International Battery Hybrid Fuel Cell Electric Vehicle Symposium*. Citeseer, 2009. p. 1-9.

CHAdEMO. V2G (Vehicle-to-Grid). 2022. Disponível em: https://www.chademo.com/products/products_type/v2g/. Acesso em: 15 jun. 2023.

DELGADO, Fernanda et al. *Carros elétricos*. 4. ed. Rio de Janeiro: FGV Energia, 2017. 99 p.

ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE (EPRI). Harmonics Load Modeling. 2013. Disponível em: <https://opendss.epri.com/HarmonicsLoadModeling.html>. Acesso em: 20 ago. 2024.

ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE (EPRI). OpenDSS Storage Element. 2020. Disponível em: <https://sourceforge.net/projects/electricdss/files/>. Acesso em: 2 abr. 2023.

ENERGISA. *NDU 042: Norma de Distribuição Unificada*. 0.0 ed. Cataguases: Energisa, 2021. 21 p.

Haidar, A. M. A.; MUTTAQI, K. M. Behavioral characterization of electric vehicle charging loads in a distribution power grid through modeling of battery

chargers. In: *IEEE INDUSTRY APPLICATION SOCIETY ANNUAL MEETING*, 2014. Anais [...]. [S.l.]: IEEE, 2014. DOI: <10.1109/ias.2014.6978412>.

HARDMAN, S. et al. A review of consumer preferences of and interactions with electric vehicle charging infrastructure. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 62, p. 508–523, jul. 2018.

HERNANDEZ, Rafael. Método de diseño de filtros basado en redes de líneas de transmisión para una topología monofásica con tecnología BPL. *Ingeniería*, v. 22, p. 347, 2017. DOI: 10.14483/23448393.12031.

IEEE. IEEE 13 Node Test Feeder. Disponível em: <https://cmte.ieee.org/pes-testfeeders/resources/>. Acesso em: 10 jun. 2023.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). *Electric Vehicle Conductive Charging System—Part 1: General Requirements*. IEC 61851-1:2017. Geneva: IEC, 2017.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *Global EV Data Explorer*. 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/global-ev-data-explorer>. Acesso em: 18 fev. 2025.

KEMPTON, Willett; TOMIĆ, Jasna. Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue. *Journal of Power Sources*, v. 144, n. 1, p. 268-279, 2005.

KUMAR, Pulkit et al. A comprehensive review of vehicle-to-grid integration in electric vehicles: Powering the future. *Energy Conversion and Management: X*, v. 25, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/journal/energy-conversion-and-management-x>. Acesso em: 29 jan. 2025.

LOPES, J. A. P.; SOARES, F. J.; ALMEIDA, P. M. R. Integration of Electric Vehicles in the Electric Power System. *Proceedings of the IEEE*, v. 99, n. 1, p. 168–183, 2011. DOI: <10.1109/jproc.2010.2066250>.

LUGENERGY (Portugal). Tipos de Carregamento para veículos elétricos (4 Modos). In: *LUGENERGY (Portugal)*. Tipos de Carregamento para veículos

elétricos (4 Modos). Portugal, 2016. Disponível em: <https://www.lugenergy.pt/tipos-de-carregamento-4modos/>. Acesso em: 30 maio 2024.

MAGNUM CAP. V2G 4.0. 2020. Disponível em: https://www.chademo.com/wp2016/wp-content/uploads/2019/10/V2G%204.0_EN_2019.pdf. Acesso em: 15 jul. 2023.

NEOCHARGE. Tipos de Carros Elétricos - Veículos Elétricos (VE). 2019. Disponível em: <https://www.neocharge.com.br/tudo-sobre/carro-eletrico/tipos-veiculos-eletricos>. Acesso em: 22 dez. 2022.

PAOLI, Leonardo; GUL, Timur. IEA (2022), Electric cars fend off supply challenges to more than double global sales, IEA, Paris. Disponível em: <https://www.iea.org/commentaries/electric-cars-fend-off-supply-challenges-to-more-than-double-global-sales>.

RODRIGUES, M. do C. B. P. et al. Conexão de veículos elétricos à rede de energia elétrica para recarga de baterias: uma visão geral. *Revista Brasileira de Inovação*, v. 19, n. 2, p. 193–207, 2014.

ROSA, Jonas Menon da; GRASSI, Fernando; RECH, Cassiano. Desenvolvimento de uma Estação de Recarga Modo 3 para Veículos Elétricos. Santa Maria: UFSM, 2021. 6 p.

TOYOSHIMA, Denis T. et al. Introdução ao conceito Vehicle-to-Grid. *Journal of Applied Instrumentation and Control*, Ponta Grossa, p. 1-6, abr. 2021.

VAZ, Pedro Gustavo Pereira Granjo. *Análise dos sistemas G2V e V2G no contexto da integração de geração renovável.* 2019. 112 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2019.

WAT ELECTRONICS. *Shunt Capacitor – Working & Advantages.* 2021.
Disponível em: <https://www.watelectronics.com/shunt-capacitor-working-advantages/>. Acesso em: 19 fev. 2025.