

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Especialização em Fontes Renováveis: Geração, Operação e Integração

Giorgio Félix da Silva

**Análise dos impactos de instalações de unidades de recarga de veículos
elétricos em condomínios residenciais**

Belo Horizonte - MG

2022

Giorgio Félix da Silva

Análise dos impactos de instalações de unidades de recarga de veículos elétricos em condomínios residenciais

Aprovada em 28 de julho de 2022.

Monografia de especialização apresentada à Banca Examinadora designada pela Comissão Coordenadora da Especialização em Fontes Renováveis da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do Certificado de Especialista em Fontes Renováveis de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Danilo Iglesias Brandão.

Belo Horizonte - MG
2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM FONTES RENOVÁVEIS - GERAÇÃO, OPERAÇÃO E INTEGRAÇÃO

ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA / TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)

Aos vinte e oito dias do mês de julho de 2022, às 16:00 h min, o/a estudante **GIORGIO FÉLIX DA SILVA**, matrícula 2019724299, defendeu o Trabalho intitulado "Análise dos impactos de instalações de unidades de recarga de veículos elétricos em condomínios residenciais"

tendo obtido a média (80) .

Participaram da banca examinadora os abaixo indicados, que, por nada mais terem a declarar, assinam eletronicamente a presente ata.

Nota: 80 (oitenta)

Orientador(a): Prof. Dr. Danilo Iglesias Brandão

Nota: 80 (oitenta)

Examinador(a): Prof. Dr. Igor Amariz Pires

Nota: digitar a nota em numeral (escrever a nota por extenso)

Examinador(a): nome completo do examinador

Nota: digitar a nota em numeral (escrever a nota por extenso)

Examinador(a): nome completo do examinador



Documento assinado eletronicamente por **Danilo Iglesias Brandao, Professor do Magistério Superior**, em 04/08/2022, às 11:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Igor Amariz Pires, Professor do Magistério Superior**, em 04/08/2022, às 18:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1620378** e o código CRC **68DEC760**.

Este documento deve ser editado apenas pelo Orientador e deve ser assinado eletronicamente por todos os membros da banca.

RESUMO

Mudanças em prol de melhorias na disponibilidade de energia elétrica, otimização da utilização dos recursos energéticos, melhoria na mobilidade urbana e nos transportes rodoviários e a gradual substituição da matriz energética na alternância dos combustíveis fósseis para a energia elétrica por meio dos veículos elétricos, trazem desafios de ordem ampla e em particular em qualidade de energia elétrica. Dessa forma, é necessário conhecer a influência causada pelos geradores renováveis e recarregadores de veículos elétricos no sistema de energia. As microrredes são entidades elétricas inseridas no contexto de redes inteligentes, sendo caracterizadas como sistemas de energia com capacidade de autogeração. Neste cenário, as microrredes despacháveis têm papel primordial, no contexto de redes inteligentes e dotadas de tecnologia da informação para fornecer eletricidade eficiente, confiável e segura. Os conversores eletrônicos de potência são responsáveis pela interface das fontes primárias de energia distribuídas com a rede principal. Usualmente, a fonte primária de microgeração é baseada em energias renováveis de pequena escala e a sua instalação ocorre em redes de média e baixa tensão. Este trabalho propõe realizar as análises dos impactos de instalações de recarregadores de veículos elétricos instalados em uma microrrede despachável. As avaliações serão realizadas em um condomínio residencial composto por trinta residências sendo populado em três frações de dez unidades de recargas das baterias em três ciclos até a integralidade. O sistema elétrico de potência será composto por seis geradores fotovoltaicos despacháveis. O armazenamento de energia será provido pelas baterias dos veículos elétricos fornecendo potência na demanda de ponta. A microrrede despachável foi implementada e simulada nos softwares Matlab™ e o Simulink, no domínio fasorial, considerando um sistema trifásico e foram comparadas as demandas totais, perfis da corrente e tensão, desequilíbrio percentual de tensão, as potências das cargas em cada um dos quatro ciclos previstos, sem os veículos elétricos e então os três ciclos. O replanejamento, revisões ou possíveis e necessários investimentos na infraestrutura de distribuição com o aumento da demanda relativa ao incremento de veículos elétricos no condomínio não são considerados. Os resultados de simulação mostram que a microrrede teria capacidade de operar com a demanda extra, atendendo os resultados de desvio de tensão conforme estabelecido nos padrões internacionais. Entretanto, tais parâmetros sem a análise sistêmica e sem o replanejamento do sistema de distribuição, automação, capacidade de armazenamento e revisão das proteções do sistema elétrico de potência colapsará uma vez que a tensão de atendimento apresentou valores muito abaixo dos índices críticos, além da sobrecorrente podendo atuar na proteção, no instante das recargas simultâneas dos veículos elétricos.

Palavras-chave: microrrede despachável, veículos elétricos, fontes de energia renováveis, geradores fotovoltaicos, *smart grid*.

ABSTRACT

Changes to improve the availability of electric power, optimization of the use of energy resources, improvement in urban mobility and road transport and the gradual replacement of the energy matrix in the alternation of fossil fuels for electric energy through electric vehicles, bring wide-ranging challenges, particularly in terms of electrical power quality. Thus, it is necessary to know the influence caused by renewable generators and electric vehicle chargers on the grids and energy system. Microgrids are electrical entities inserted in the context of smart grids, being characterized as energy systems with self-generation capacity. In this scenario, dispatchable microgrids play a key role in the context of smart grids equipped with information technology to provide efficient, reliable, and safe electricity. The electronic power converters are responsible for interfacing the primary sources of energy distributed with the main grid. Usually, the primary source of microgeneration is based on small-scale renewable energy and its installation takes place in medium and low voltage networks. This work proposes to carry out the analysis of the impacts of installations of electric vehicle chargers installed in a dispatchable microgrid. The evaluations will be carried out in a residential condominium composed of thirty residences, being populated in three fractions of ten battery recharge units in three cycles until completeness. The electrical power system will consist of six dispatchable photovoltaic generators. Energy storage will be provided by electric vehicle batteries providing power at peak demand. The dispatchable microgrid was implemented and simulated in Matlab™ and Simulink software, in the phasor domain, considering a three-phase system, and the total demands, current and voltage profiles, percentage voltage unbalance, load powers in each of the four predicted cycles, without electric vehicles and then the three cycles. The replanning, revisions, or possible and necessary investments in the distribution infrastructure with the increase in demand related to the increase of electric vehicles in the condominium are not considered. The simulation results show that the microgrid would be able to operate with the extra demand, meeting the voltage deviation results as established by international standards. However, such parameters without the systemic analysis and without the replanning of the distribution system, automation, storage capacity and review of the protections of the electrical power system will collapse since the service voltage presented values far below the critical indices, in addition to the overcurrent being able to act in the protection system, in the instant of the simultaneous recharges of the electric vehicles.

Keywords: dispatchable microgrid, electric vehicles, renewable energy power sources, photovoltaic generators, smart grid.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura da rede elétrica e cargas.	15
Figura 2: Estrutura de ampliação de utilizadores na rede elétrica.....	15
Figura 3: Análise comparativa de diferentes veículos na estrada.	17
Figura 4: Comercialização de EV e PHEV.	18
Figura 5: Ciclos termodinâmicos mais comuns dos ICEs.....	19
Figura 6: Configuração genérica de um veículo convencional.	19
Figura 7: Configuração dos veículos HEV.....	20
Figura 8: Configuração dos veículos HEV com o sistema CSIM.....	22
Figura 9: Comparação dos níveis de hibridização, custo e potência.....	23
Figura 10: Configuração dos veículos BEV.....	25
Figura 11: Vista de uma máquina modular em cascata.	27
Figura 12: Configuração dos veículos FCEV.....	28
Figura 13: Audi e-tron – principais dimensões.	29
Figura 14: Audi e-tron – resumo das dimensões internas e externas.	30
Figura 15: Motores elétricos do Audi e-tron.	31
Figura 16: Circuito elétrico de acionamento e conversão de energia do Audi e-tron.....	31
Figura 17: Curva característica do motor elétrico dianteiro.	32
Figura 18: Curva característica do motor elétrico traseiro.....	32
Figura 19: Diagrama de conexão do módulo 95 kWh com configuração 4p3s.	32
Figura 20: Bateria de alta tensão do e-tron.	34
Figura 21: Conexão do BEV à rede elétrica para a recarga inteligente.....	34
Figura 22: SoC vs. autonomia vs. capacidade nominal.....	36
Figura 23: Soc vs. autonomia vs. capacidade nominal – linearização.	36
Figura 24: Representação do processo de conversão fotovoltaica.	37
Figura 25: Exemplo de uma curva característica V_{xl} de uma célula fotovoltaica.	37
Figura 26: Exemplo de uma curva característica V_{xP} de uma célula fotovoltaica.....	37
Figura 27: Associações de dispositivos fotovoltaicos com diodo de bloqueio.	38
Figura 28: Diagrama de blocos do sistema fotovoltaico conectado à rede típico.	39
Figura 29: Arquiteturas de um sistema fotovoltaico.....	39
Figura 30: Sistema de geração fotovoltaico isolado.	42
Figura 31: Organização centralizada tradicional do setor energético.....	47
Figura 32: Ilustração de uma rede inteligente nanogrid tradicional residencial.	47
Figura 33: SEP conceitual híbrido hierarquicamente interconectado de sub-redes.	48
Figura 34: Compartilhamento de potência e single-controllable entity	49
Figura 35: Operação em ambos os modos de controle - ilhado ou conectado.	49
Figura 36: Hierarquia de controle do sistema elétrico de potência com MR.	50
Figura 37: Estrutura da rede elétrica, cargas e BEV.	51
Figura 38: Demanda da rede na condição inicial.	52
Figura 39: Perfil de tensão da rede na condição inicial.	53
Figura 40: Perfil de corrente da rede na condição inicial.....	53
Figura 41: Desequilíbrio de tensão [%] na condição inicial.	54
Figura 42: Potência unitária dos BEV conectados no SEP – loop 1.....	56
Figura 43: Balanço energético dos BEV no SEP – loop 1.....	56
Figura 44: Balanço energético dos BEV no SEP – loop 2.....	56
Figura 45: Balanço energético dos BEV no SEP – loop 3.....	57
Figura 46: Análises das faixas de variações das tensões (TA).	57
Figura 47: Potências dos GDs e controles de saída na condição inicial.	58

Figura 48: SoC das baterias dos BEV no loop 1.	59
Figura 49: Modelo usado para as simulações no loop 1.	59
Figura 50: Modelo usado para as simulações no loop 2.	60
Figura 51: Modelo usado para as simulações no loop 3.	60
Figura 52: Análise da demanda da rede – pico da demanda.	61
Figura 53: Análise do desvio de tensão (IEEE).	61
Figura 54: Análise da tensão no PCC.	62
Figura 55: Análise da corrente no PCC.	62
Figura 56: Análises das tensões de atendimento no SEP.	63
Figura 57: Análises das potências e controles dos GDs na condição inicial.	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tempo e energia para a recarga de um BEV.....	14
Tabela 2: Veículos HEV.....	20
Tabela 3: Classificações das configurações dos HEV.....	23
Tabela 4: Características dos níveis de hibridização.....	23
Tabela 5: Descrições técnicas da bateria de alta tensão do e-tron.....	33
Tabela 6: Tempo e energia para a recarga de um BEV, reedição da Tabela 1.....	35
Tabela 7: Comparações de diferentes arquiteturas de sistemas fotovoltaicos.....	41
Tabela 8: Análise comparativa entre as gerações dos inversores.....	44
Tabela 9: Características dos BEV no SEP.....	54
Tabela 10: Potência dos BEV conectados no SEP.....	55
Tabela 11: Faixas aplicadas às tensões nominais inferiores a 1 kV.....	57

LISTA DE SIGLAS E UNIDADES

°C	Graus Celsius - unidade de temperatura no sistema internacional de unidades - SI
A	Ampères (unidade de corrente)
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Ah	Ampères hora (unidade de energia)
AM	<i>Ais mass</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEV	<i>Battery Electric Vehicles</i>
c.a.	Corrente alternada
CAGR	<i>Compound annual growth rate</i>
c.c.	Corrente contínua
CCMR	controle central da microrrede
CIGRÉ	<i>International Council on Large Electric Systems</i>
CO	<i>Carbon monoxide</i>
CO₂	<i>Dióxido de carbono</i>
CPT	<i>Conservative Power Theory</i>
CSIM	<i>Compound-Structure Integrated Machines</i>
cv	cavalos (unidade de potência) no sistema imperial de unidades
CVT	<i>Continuously Variable Transmission</i>
ECC	<i>energy control center</i> (centro de controle de energia)
EPE	Empresa de pesquisa energética
EREV	<i>Range Extender Electric Vehicle</i>
EV	<i>Electric Vehicle</i>
FCEV	<i>Fuel-Cell Electric Vehicles</i>
GD	Geração Distribuída
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GNV	Gás Natural Veicular
HC	Hidrocarbonetos
HEV	<i>Hybrid Electric Vehicles</i>
ICE	<i>Internal combustion engine</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
<i>I_{max}</i>	Corrente máxima
INEE	Instituto Nacional de Eficiência Energética
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia
<i>I_{sc}</i>	Corrente de curto-circuito
ISG	<i>Integrated Starter-Generator</i>
kg	1000 = gramas = (unidade de peso) no sistema internacional de unidades - SI
kW	1000 = Watts = (unidade de potência) no sistema internacional de unidades - SI
kWh	1000 = Watts hora = (unidade de energia) no sistema internacional de unidades - SI
lb-ft	<i>Pound-foot</i> – libra-pé (unidade de torque ou conjugado) no sistema imperial de unidades
LCA	<i>Life Cycle Assessment</i>
mm	Mili (10 ⁻³) metros – unidade de distância no sistema internacional de unidades - SI
MPP	Ponto de máxima potência (<i>Maximum Power Point</i>)
MPPT	<i>Maximum power point tracking</i>
MRs	Microrredes
NECC	<i>New European Driving Cycle</i>
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i>
Nm	Newton metro (unidade de torque ou conjugado) no sistema internacional de unidades
NOx	Óxidos de nitrogênio
OEM	<i>Original Equipment Manufacturer</i>
OMR	<i>operador da microrrede</i>
ONS	<i>Operador Nacional do Sistema Elétrico</i>

OST	Operador do sistema de transmissão
PCC	<i>Point of Common Coupling</i>
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PAC	Ponto de acoplamento comum
PdC	Ponto de conexão
PEM	<i>Polymer Electrolyte Membrane</i>
PHEV	<i>Plug-in hybrid electric vehicles</i>
PLL	<i>Phase Lock Loop</i>
ppm	Partes por milhão
PV	Sistema fotovoltaico (<i>PV - Photo-Voltaic</i>)
PWM	<i>Pulse width modulation</i>
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
RB	<i>Regenerative Braking</i>
REDS	recursos de energia distribuída
SA	serviços ancilares
SAEs	sistemas de armazenamento de energia
SEP	sistema elétrico de potência
SFCR	Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede
SG	<i>Smart Grid</i> (redes inteligentes)
SI	Sistema internacional de unidades
SoC	<i>State of Charge</i>
SOFC	<i>Solid Oxide Fuel-Cells</i>
STATCOM	<i>Static Synchronus Compensator</i>
STC	<i>Standard Test Conditions</i>
STE	sistema transaccional de energia
SUV	<i>Sport Utility Vehicle</i>
TA	Tensão de Atendimento
TL	Tensão de Leitura
TN	Tensão Nominal
Tg	Tera gramas (10^{12} - 1.000.000.000.0000 gramas)
TtR	<i>Through the Road</i>
UE	União Europeia
V	Volts (unidade de tensão)
V_{max}	Tensão máxima
V_{oc}	Tensão de circuito aberto
WLTP	<i>Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicle Test Procedure</i>
μC	Microcontroladores

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. JUSTIFICATIVA	13
1.3. OBJETIVOS	14
1.3.1. Objetivo Geral	14
1.3.2. Objetivo Específico	14
1.4. METODOLOGIA	15
1.5. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	16
2. ELETRIFICAÇÃO E TECNOLOGIAS AUTOMOTIVAS	16
2.1. Veículos convencionais	18
2.2. Veículos híbridos, elétricos e elétricos de célula de combustível	19
2.2.1. Veículos híbridos	19
2.2.1.1. Sistema híbrido série.....	20
2.2.1.2. Sistema híbrido paralelo.....	20
2.2.1.3. Sistema híbrido série-paralelo.....	21
2.2.1.4. Sistema híbrido-complexo	21
2.2.1.5. Sistema híbrido Through the Road (TtR).....	21
2.2.1.6. Máquinas integradas de estrutura composta.....	21
2.2.1.7. Níveis de Hibridização	22
2.2.2. Veículos elétricos	24
2.2.2.1. BEV - Configuração 1	25
2.2.2.2. BEV - Configuração 2	25
2.2.2.3. BEV - Configuração 3.....	25
2.2.2.4. BEV - Configuração 4.....	26
2.2.2.5. BEV - Configuração 5.....	26
2.2.2.6. BEV - Configuração 6.....	26
2.2.2.7. BEV - Configuração 7.....	26
2.2.2.8. BEV - Configuração 8.....	26
2.2.3. Veículos elétricos de célula de combustível	27
2.2.3.1. Arquitetura puramente elétrica	28
2.2.3.2. Arquitetura híbrida	28
2.2.4. Audi e-tron	29
2.2.4.1. Características técnicas gerais.....	29
2.2.4.2. Sistema de propulsão elétrica	30
2.2.4.3. Acumulador de energia: bateria	32
2.2.4.4. Recarga da bateria do Audi e-tron	33
3. GERADORES FOTOVOLTAICOS E MICRORREDES	36
3.1. Geradores fotovoltaicos	36
3.1.1. Arquitetura com inversor central	40
3.1.2. Arquitetura com inversor string	40

3.1.3. Arquitetura com inversor multi string	40
3.1.4. Arquitetura com micro inversor	41
3.2. Inversores e MPPT	42
3.3. Geração distribuída.....	44
3.4. Microrredes despacháveis	46
4. MODELAGEM E RESULTADOS DOS IMPACTOS DAS INSTALAÇÕES DE BEV EM MICRORREDES DESPACHÁVEIS	51
4.1. Modelagem.....	51
4.1.1. Estrutura do sistema elétrico	51
4.1.2. Veículos elétricos e hosting capacity.....	54
4.2. Resultados e discussões.....	59
5. CONCLUSÃO	65
BIBLIOGRAFIA	66

1. INTRODUÇÃO

Ao discutir a relevância dos veículos elétricos em relação ao transporte rodoviário atual e futuro, é importante analisar os diferentes sistemas de propulsão oferecidos hoje e potencialmente no futuro próximo. Existem os veículos com motor de combustão interna (*ICE - Internal combustion engine*) e estão presentes na grande maioria dos veículos produzidos e comercializados até hoje. Esses veículos podem ser movidos usando diferentes combustíveis fósseis líquidos ou gasosos (gasolina, diesel, GLP – gás liquefeito de petróleo, GNV - Gás natural veicular) ou ainda biocombustíveis (bioetanol, biodiesel, etc.) e envolvem a ignição do combustível para acionar pistões ou rotores para girar um eixo de transmissão e, por sua vez, impulsionar o veículo. Por meio desse processo, a maior parte da energia armazenada no combustível é perdida (Whitehead et al., 2018), razão pela qual os *ICEs* são relativamente ineficientes em termos energéticos e produzem quantidades significativas de gases de efeito estufa e emitem gases poluentes do ar.

Em um esforço para encontrar alternativas aos combustíveis fósseis para otimizar a eficiência, além de mitigar as emissões de carbono, vários esforços foram realizados para operar os *ICEs* utilizando biocombustíveis. Os biocombustíveis variam significativamente em composição, custo e perfil de emissões. Eles têm o potencial de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, mas ainda emitem poluentes atmosféricos nas estradas. É importante ressaltar que muitos biocombustíveis impactam as matérias-primas utilizadas atualmente para a produção de alimentos; um problema que precisa ser cuidadosamente gerido (Whitehead et al., 2018). Recentemente, os veículos elétricos surgiram como uma alternativa viável aos *ICEs*, em particular devido aos avanços significativos na densidade de energia das baterias e em particular devido à eficiência dos veículos elétricos a bateria (*BEV - battery electric vehicles*) (Whitehead et al., 2018; Ravindranath et al., 2022).

Os estudos da abordagem do ciclo de vida (*LCA - life cycle assessment*) (Mierlo, et al. 2013), nos quais são calculadas as influências do produto no meio ambiente durante todo o seu ciclo de vida (do berço ao túmulo), apresentam resultados das reduções de emissões ao substituir veículos movidos a combustível fóssil por *BEV* (*BEV - battery electric vehicles*). A eletromobilidade oferece um futuro promissor em termos de mudanças climáticas, qualidade do ar, criação de empregos, crescimento econômico, redução e da dependência do petróleo (Mierlo, et al. 2013). Portanto, os *BEV* estão se tornando uma opção para auxiliar a mitigar a mudança climática que tanto tem causado preocupação (Mierlo, et al. 2013; Hawkins, et al. 2013), mas a falta de infraestrutura pode ser um obstáculo para a expansão do *BEV* (Costa et al., 2019). Além disso, a maioria dos estudos sobre veículos elétricos são restritos a países desenvolvidos que possuem uma realidade sócio-técnico-econômica diferente em relação aos países em desenvolvimento (Costa et al., 2019). Análises anteriores (Costa et al., 2014, 2017, 2019) revelaram que se a cidade de São Paulo - SP substituísse 20% de sua frota de carros a gasolina por *BVEs* até 2030, as emissões seriam reduzidas em torno de 11,0 Tg CO₂ (Tg = 1 tera gramas = 1.000.000.000.000 gramas), com aumento insignificante das emissões de CO₂ pelo consumo de eletricidade.

O aumento dos *BEV* nos centros urbanos e estradas levantam questões sobre o seu impacto na rede elétrica, em termos de qualidade de energia elétrica (QEE – Qualidade de Energia Elétrica) (Pinto et al., 2015) e a sua recarga pode levar a problemas de QEE (Tao et al., 2013). Portanto, é necessário conhecer a influência no sistema de energia causada pelos carregadores das baterias dos

veículos elétricos conectados nos sistemas de distribuição antes das operações em escala dos *BEV*.

Neste cenário, onde é observado o aumento da frota dos *BEV*, a alternância da matriz energética – fóssil para elétrica, a demanda por investimentos na infraestrutura da rede elétrica (pontos de recarga e análise dos impactos na rede elétrica) e no aspecto da qualidade de energia são necessários estudos e discussões para a compreensão dos impactos imediatos e instalações de pontos de recarga de energia. Serão avaliados os veículos 100 % elétricos.

1.1. JUSTIFICATIVA

A QEE, amplamente debatida no setor elétrico nos últimos anos, tem sido usado lato-sensu para expressar as mais variadas características da energia elétrica entregue pelas concessionárias aos consumidores. A definição abrangente se refere a QEE como sendo uma medida de quão bem a energia elétrica pode ser utilizada pelos consumidores, incluindo características de continuidade de suprimento e de conformidade com certos parâmetros considerados desejáveis para a operação segura, tanto do sistema supridor como das cargas elétricas. Entre os parâmetros a considerar tem-se (Deckmann, Pomilio, 2020):

- Distorções;
- Flutuações de tensão;
- Variações de tensão de curta duração;
- Desequilíbrio de sistemas trifásicos;
- Transitórios.

No Brasil algumas normas internacionais são adotadas integralmente ou adaptadas parcialmente. Existem discussões e tendência de longo prazo de se chegar a um consenso internacional, entre o *IEEE* nos Estados Unidos, *IEC* e *CIGRÉ* na Europa (Deckmann, Pomilio, 2020). A falta de unificação de procedimentos e critérios prejudica os consumidores. Um recarregador de bateria dos *BEV* previsto para utilização sob determinadas condições no país de origem, pode apresentar funcionamento inadequado quando utilizado em uma rede com características e padrões de comportamento distintos, devido aos referenciais normativos, por exemplo.

A crescente oferta dos *BEV* no mercado nacional impactará no aumento das demandas conectadas à rede elétrica. As conexões dessas cargas gerarão distúrbios na rede e mudarão o comportamento de QEE, como afundamentos e desequilíbrio de tensão e sobrecarga nos alimentadores e transformadores. Este trabalho visa avaliar, sob a perspectiva da QEE, o impacto de instalações de unidades de recarga de *BEV* em uma rede elétrica de baixa tensão sem os devidos planejamentos, revisões ou possíveis e necessários investimentos na infraestrutura de distribuição, por exemplo.

A recarga de um *BEV* demanda de 2,2 a 11 kW. O tempo de recarga dos *BEV* pode variar de 30 minutos a 8,5 horas para a recarga completa da bateria dos veículos elétricos, conforme resumido e apresentado na Tabela 1, de acordo com as referências do fabricante (Audi Brasil, 2020). Os carregadores são monofásicos e a tensão nominal são 220 V.

Tabela 1: Tempo e energia para a recarga de um BEV.

Fonte: Audi Brasil, 2020.

Tempo de recarga (h)	Potência de recarga: 2,2 kW		Potência de recarga: 7,2 kW		Potência de recarga: 11 kW	
	Recarga da bateria (kWh)	Distância total (km)	Recarga da bateria (kWh)	Distância total (km)	Recarga da bateria (kWh)	Distância total (km)
0,5	1,10	5,0	3,60	17,0	5,50	25,0
1,0	2,20	10	7,20	33,0	11,0	50,0
4,0	8,80	40	28,8	132	44,0	201
6,0	13,2	60	43,2	198	66,0	302
8,5	18,7	86	61,2	280	93,5	429

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo Geral

O presente projeto de monografia objetiva avaliar os impactos das instalações de unidades de recarga de *BEV*, sob a perspectiva da QEE, em uma rede elétrica de baixa tensão sem os devidos planejamentos, revisões ou possíveis e necessários investimentos na infraestrutura de distribuição, proteção e automação.

1.3.2. Objetivo Específico

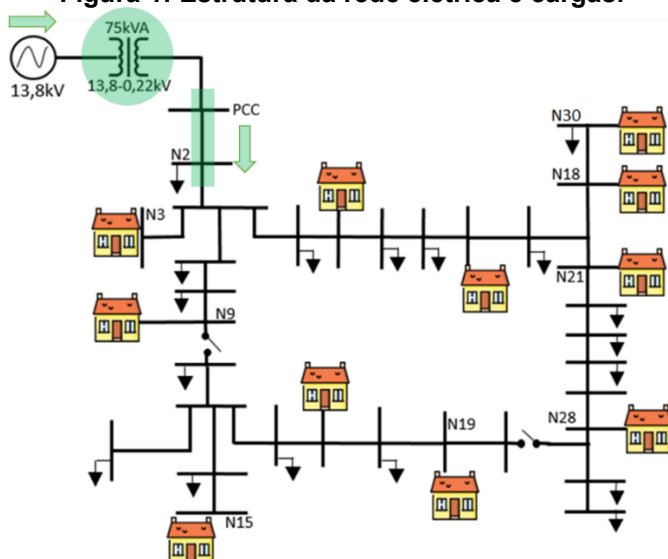
As pretensões do trabalho são as análises entre os comportamentos da rede de distribuição em um dia comum sem as alterações do alimentador.

As avaliações serão realizadas em um condomínio residencial com trinta residências e no ambiente de simulações serão inseridas cargas (unidades de recarga) e serão comparadas as demandas totais, perfis da corrente e tensão, desequilíbrio percentual de tensão em quatro condições:

1. Condições iniciais: sem unidades de recarga dos *BEV*;
2. Um terço dos utilizadores do condomínio terão unidades de recarga dos *BEV*;
3. Dois terços dos utilizadores do condomínio terão unidades de recarga dos *BEV*;
4. Todos os utilizadores do condomínio terão unidades de recarga dos *BEV*;

Cada utilizador no caso em questão será um proprietário de uma residência no condomínio, conforme ilustrado na Figura 1. Será avaliado o comportamento sistêmico e é pretendido iniciar discussões sobre o tema sobre os impactos na alternância abrupta na matriz energética de combustíveis fósseis para a energia elétrica no contexto da mobilidade urbana.

Figura 1: Estrutura da rede elétrica e cargas.



1.4. METODOLOGIA

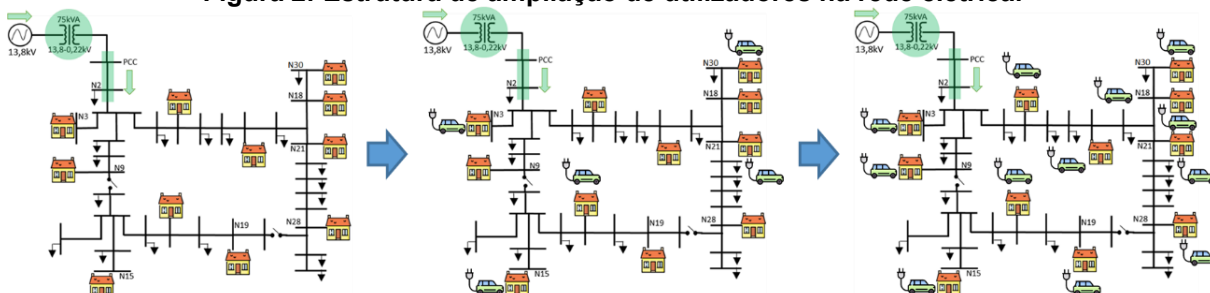
Sob a perspectiva de adições gradativas de carga em um sistema de distribuição composto de um transformador abaixador alimentando trinta residências são pretendidas as realizações de simulações computacionais e a extensão das cargas em três ciclos com a adição de dez cargas em cada etapa, até a integralidade, conforme ilustrado na Figura 2. Serão comparados os comportamentos desde a situação inicial até o cenário onde todos os utilizadores apresentariam cargas adicionais referentes à unidade de recarga das baterias dos *BEV*.

Para a elaboração do projeto será realizada a revisão bibliográfica dos estudos, análises de artigos e normas de referência disponíveis e livros para embasar o tema. Será revisada a potência do posto distribuidor, cargas e das unidades de recarga dos *BEV* para a compreensão da potência instalada, bem como o fator de demanda, para que a simulação apresente tendências próximas à realidade do mercado.

As análises computacionais serão realizadas com as ferramentas Matlab e Simulink. A estimativa do *SoC* (*state of charge*) será determinada por meio de contagem de coulomb (Brandão, 2013).

Os *BEV*, serão integralmente elétricos, como referido anteriormente. Os pontos de recarga serão considerados pontuais, isto é, uma unidade de recarga por residência e será o foco do estudo definir diferentes estados de carga e potências.

Figura 2: Estrutura de ampliação de utilizadores na rede elétrica.



1.5. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Após o capítulo introdutório, o capítulo 2 descreve as tecnologias automotivas típicas de eletrificação híbrida, elétrica e a célula de combustível.

O capítulo 3 define geração distribuída e microrredes, assim como descreve o sistema fotovoltaico e seu inversor.

O capítulo 4 apresenta a plataforma de simulação desenvolvida para esse trabalho e os resultados. Foi simulada uma microrrede despachável usando as ferramentas disponíveis nos softwares Matlab™ e o Simulink, no domínio fasorial, considerando um sistema trifásico.

O capítulo 5 conclui e apresenta as propostas de continuidade do trabalho.

2. ELETRIFICAÇÃO E TECNOLOGIAS AUTOMOTIVAS

A invenção dos veículos com *ICE* foi uma das realizações mais significativas no domínio do transporte. No entanto, um aumento no número de automóveis tem causado grandes desafios na vida humana. A questão mais premente hoje em dia é o implacável aumento diário dos preços do petróleo, bem como o consequente esgotamento das reservas globais de petróleo. Com isso, a tendência atual é a utilização de veículos elétricos (*EV – Electric Vehicles*). Além disso, os *EV* são até quatro vezes mais eficientes quando comparados aos motores de combustão interna e sua energia pode ser gerada localmente a partir de fontes renováveis (Ravindranath et al., 2022 e Selvakumar, 2021). A Figura 3 apresenta as análises comparativas entre os diferentes tipos de propulsão usados nos veículos, bem como suas respectivas eficiências, perdas e usos energéticos. Inúmeras vantagens dos *EV* sobre os veículos tradicionais atraem os usuários. As vantagens incluem zero emissões, confiabilidade, custo, eficiência, simplicidade, acessibilidade, torque máximo de partida e conforto (Ravindranath et al., 2022 e Selvakumar, 2021). Em comparação com os veículos de combustão típicos, os custos de manutenção dos *EV* e o custo da eletricidade necessária são significativamente mais baratos. Os *EV* têm um custo de energia substancialmente menor por quilômetro em comparação com os automóveis comuns. As economias de custo por quilômetro oferecidas por diferentes veículos movidos a Gasolina, Etanol (E85), Híbrido (etanol e gasolina), Óleo Diesel, Biodiesel, Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), Gás Natural Veicular (GNV) e Eletricidade são de 0%, 1%, 20%, 23%, 27%, 33%, 38% e 75%, respectivamente (Ravindranath et al., 2022).

Os *EV* enfrentam grandes desafios relacionados à bateria, como autonomia, tempo de carregamento, custo, volume e peso. As baterias são grandes e volumosas, ocupando muito espaço no veículo. O peso das baterias é estimado em cerca de 200 kg, embora isso possa variar dependendo de sua capacidade (Ravindranath et al., 2022).

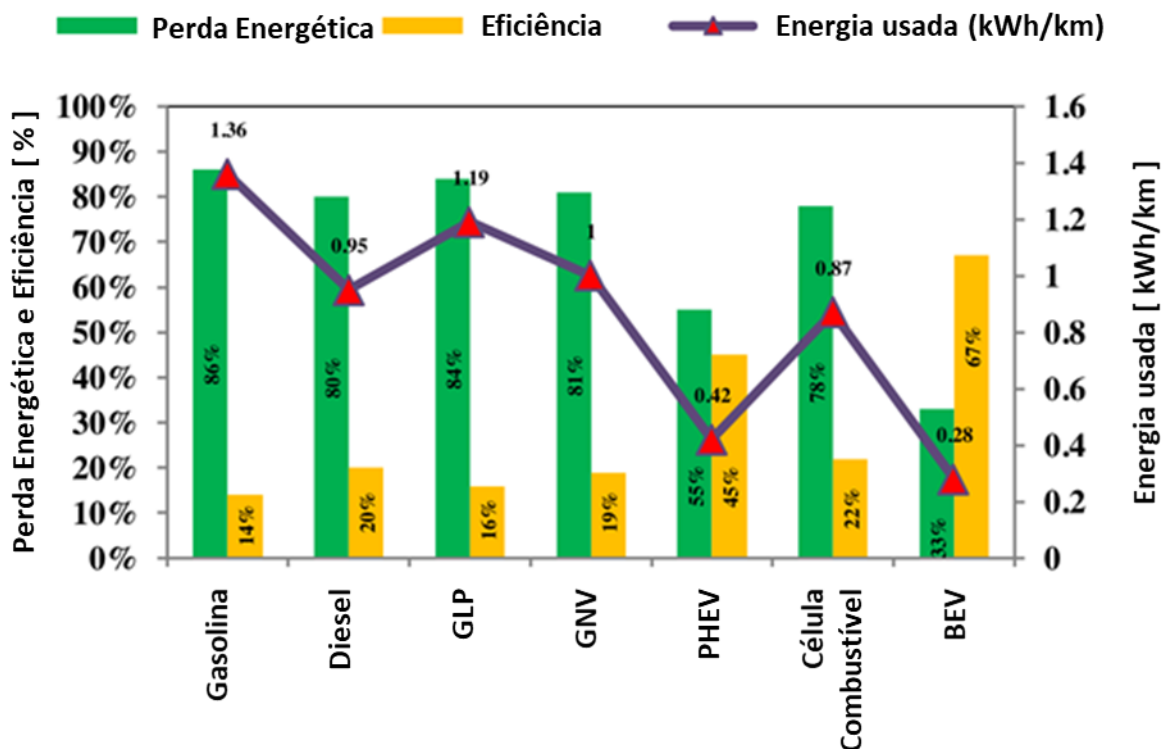
Os veículos mais leves aceleram mais rápido e consomem menos energia, resultando em maior eficiência. Como resultado, a tecnologia dos *EV* passou por avanços tecnológicos significativos para fornecer uma transição suave dos tradicionais veículos de transporte movidos a diesel ou gasolina. É importante ressaltar que deve haver melhorias expressivas na densidade de potência, bem como na eficiência dos conversores de energia. Apesar dos *EV* terem um preço de compra mais alto quando comparados à versão com *ICE* do mesmo tipo de veículo, as vendas de *EV* aumentaram significativamente nos últimos anos e cerca de 95% dos *EV* foram comercializados em 10 países. A China ocupa a primeira posição na

lista de países no ranking de comercializações de *EV*. A Figura 4 destaca as vendas de *EV* e híbridos (*PHEV - Plug-in hybrid electric vehicles* - veículo elétrico híbrido com a versão conectado à rede) e as projeções até 2035, onde são estimadas 20 milhões de unidades vendidas em 2030 e 27,5 milhões em 2035 (Ravindranath et al., 2022).

Entre 2020 e 2026, é estimado o crescimento do mercado global de *EV* mais de quatro vezes para se aproximar do tamanho do mercado global previsto de cerca de US \$725 bilhões até 2026. Isso é equivalente a uma taxa de crescimento anual composta (*CAGR*) de mais de 27 % entre 2020 e 2026 (Ravindranath et al., 2022). Além disso, vários países estão se preparando para a mudança de mobilidade, restringindo o uso de veículos movidos a combustíveis fósseis e incentivando o uso de *EV*, principalmente após o Acordo de Paris, o tratado internacional sobre as mudanças climáticas causadas pelo homem. Alguns governos estão oferecendo subsídios para os *EV* para promover a mobilidade ecologicamente correta. Espera-se que o mercado de *EV* da Índia cresça a um *CAGR* de 90% nesta década para lucrar US \$150 bilhões até 2030 (Ravindranath et al., 2022). Portanto, considerando as regulamentações cada vez mais rigorosas sobre emissões e economia de combustível e a sociedade cada vez mais envolvida na necessidade de proteger o meio ambiente, os veículos elétricos a bateria (*BEV - battery electric vehicles*), veículos elétricos híbridos (*HEV - hybrid electric vehicles*) e veículos elétricos a célula de combustível (*FCEV - fuel-cell electric vehicles*) estão atraindo cada vez mais a atenção dos políticos, consumidores e do setor automotivo.

Figura 3: Análise comparativa de diferentes veículos na estrada.

Fonte: Ravindranath et al., 2022.

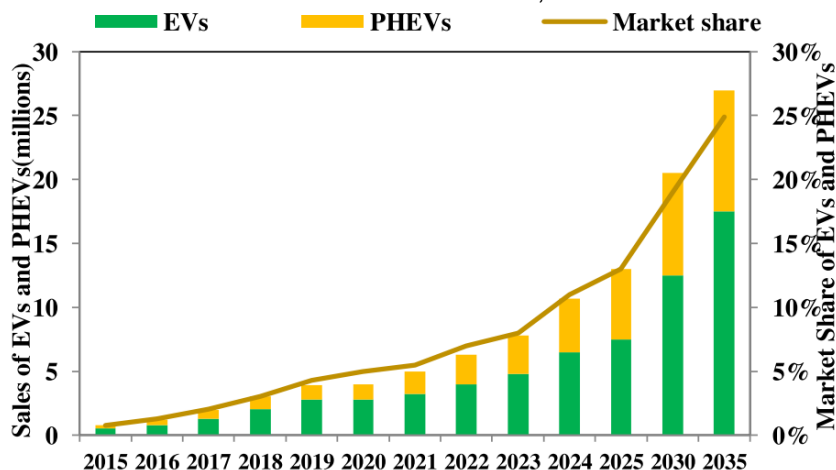


Embora os veículos movidos com *ICE* tenham sido a tecnologia dominante no século XX, a eletrificação de veículos é hoje uma realidade (Cabezuelo et al., 2017). No sentido mais simples, os veículos elétricos desenvolvidos empregam motores elétricos, em vez do motor convencional de combustão interna e são uma

promissora solução para minimizar as emissões de poluentes, mitigar a poluição sonora, por apresentar maior eficiência do motor, torque máximo de partida e menores custos de manutenção (Selvakumar, 2021).

Figura 4: Comercialização de EV e PHEV.

Fonte: Ravindranath et al., 2022.



2.1. Veículos convencionais

Existem dois tipos de *ICE* usados em veículos convencionais, diferenciados pelo ciclo termodinâmico usado para transformar energia térmica em mecânica, conforme ilustrado nas Figuras 5 e 6 e apresentados nos subitens a seguir.

- Ciclo Otto: combustão com ignição por centelhamento e volume constante. É alimentado por gasolina e/ou etanol e/ou gás natural veicular.
- Ciclo Diesel: combustão por compressão e de pressão constante. É movido a diesel.

Embora ambos os ciclos tenham melhorado com o passar dos anos, o diesel sempre teve uma melhor eficiência. A diferença está no próprio ciclo termodinâmico. No ciclo Otto a combustão é realizada teoricamente a volume constante, enquanto no ciclo Diesel é realizada teoricamente a pressão constante. Ambos os motores são máquinas térmicas e seus desempenhos são limitados pela eficiência máxima de Carnot. No entanto, sua operação é substancialmente diferente e, por definição, menos eficiente do que a máquina perfeitamente reversível (Cabezuelo et al., 2017).

A eficiência máxima de um motor a gasolina teórico perfeito com uma taxa de compressão de 8:1 é de 56,5%, enquanto no caso de um motor a diesel teórico perfeito com uma taxa de compressão de 18:1 seria de 63,2%. Essas eficiências correspondem aos motores ideais. Os *ICEs* reais e modernos são limitados por fatores, por exemplo, a perda de energia por atrito, resfriamento, bombeamento, e isolamento térmico, por exemplo. Portanto, não é possível atingir o limite teórico máximo em aplicações reais e a eficiência média dos *ICEs* é de 25% para um ciclo Otto e 30% para um ciclo Diesel, considerando o ponto ótimo de operação. Mas estes podem ser ainda menores, pois o ponto de operação de um veículo nem sempre é o ideal (Cabezuelo et al., 2017).

Figura 5: Ciclos termodinâmicos mais comuns dos ICEs.

Fonte: Cabezuelo et al., 2017.

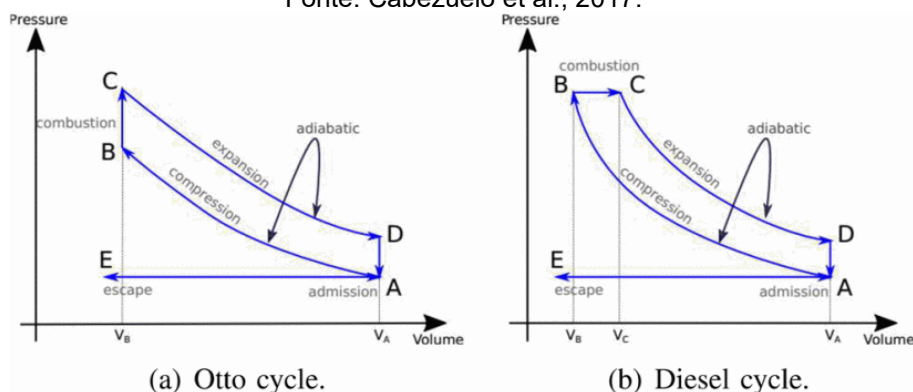
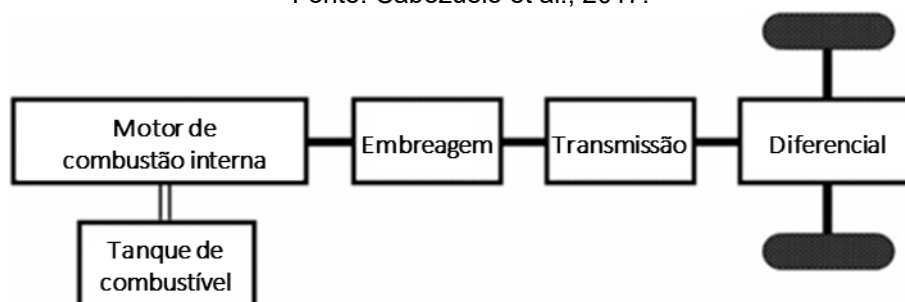


Figura 6: Configuração genérica de um veículo convencional.

Fonte: Cabezuelo et al., 2017.



A configuração de um *ICE* é baseada no conjunto que une o motor de tração e o sistema de transmissão (reduções). O combustível é armazenado em um tanque e a embreagem e o diferencial fazem parte do sistema de transmissão, conforme ilustrado na Figura 6. Ainda hoje esses veículos continuam sendo os mais vendidos e usados. Nos últimos anos, principalmente devido ao aumento dos preços dos combustíveis, os veículos movidos a gás ganharam força no mercado. Esses veículos funcionam com ciclo Otto como os a gasolina (Cabezuelo et al., 2017).

2.2. Veículos híbridos, elétricos e elétricos de célula de combustível

2.2.1. Veículos híbridos

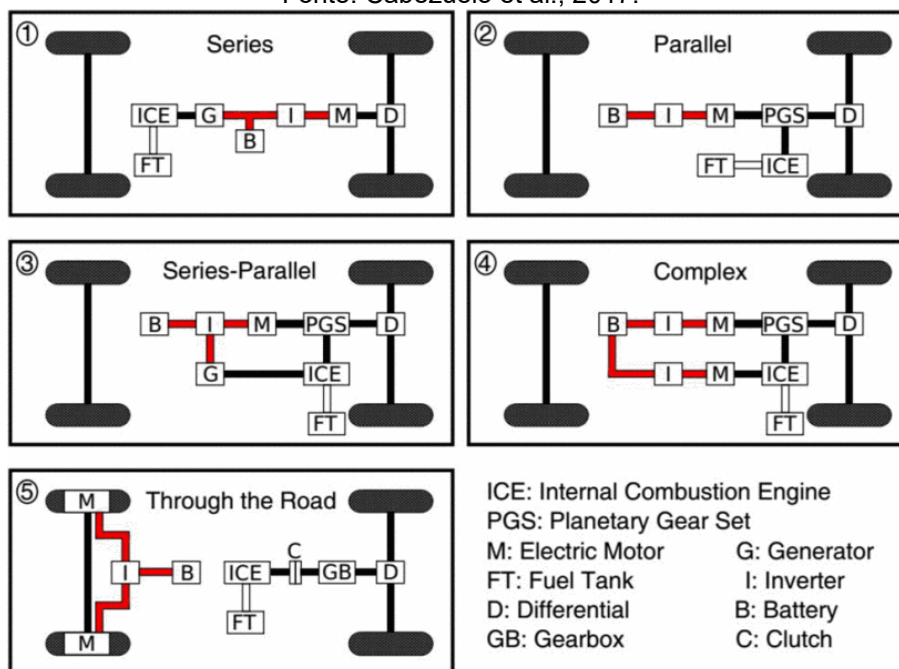
O *HEV* nasceu com o propósito de criar sinergias entre os *ICEs* e os motores elétricos, aproveitando as qualidades dos *ICEs* (autonomia e densidade de potência) e as vantagens da tração elétrica (alto torque e eficiência em baixas velocidades) oferecendo um conjunto com maior eficiência e menor impacto ambiental. Assim, o principal objetivo da hibridização é trabalhar com o *ICE* próximo à zona de máxima eficiência durante o maior tempo possível (Cabezuelo et al., 2017). Até recentemente, havia duas configurações básicas para *HEV*: série e paralelo. Mas nos últimos anos, visando melhorar o desempenho de potência e economia de combustível, algumas configurações adicionais foram desenvolvidas, conforme detalhado na Figura 7 e na Tabela 2, baseados nas configurações convencionais (série e paralela).

Tabela 2: Veículos HEV.
Fonte: Cabezuelo et al., 2017.

Configuração	Modelo	Ano	Potência (kW)	Autonomia (km)
Série	Opel Ampera	2012	111	500
Paralelo	Toyota Prius	2009	101	1150
Série-Paralelo	BYD F3DM	2008	126	430
Complexo	Cadillac Escalade	2008	282	-
Ttr	Peugeot 3008	2012	149	1500

Figura 7: Configuração dos veículos HEV.

Fonte: Cabezuelo et al., 2017.



2.2.1.1. Sistema híbrido série

Configuração na qual o *ICE* é conectado diretamente a um gerador, que carrega as baterias e/ou alimenta o motor elétrico, sendo o motor elétrico o único responsável por tracionar o veículo. Com esta configuração consegue-se maior simplicidade na mecânica do veículo e o *ICE* pode trabalhar no ponto de operação de maior eficiência. Apesar de ser uma configuração bastante eficiente, a necessidade de uma bateria com capacidade suficiente dificulta a utilização deste sistema. Essa arquitetura *HEV* possui seis modos de operação diferentes, e pode ser denominada também de *Range Extender Electric Vehicle (EREV)*.

2.2.1.2. Sistema híbrido paralelo

Esta configuração foi a primogênita no mercado e usa a tração elétrica, principalmente para melhorar a eficiência energética do *ICE*. Isso é possível fazendo o *ICE* funcionar em altas rotações. Graças ao conjunto de engrenagens planetárias, a potência de propulsão pode ser fornecida apenas pelo *ICE*, pelo motor elétrico ou por ambos. O motor elétrico pode ser utilizado como gerador para carregar a bateria por frenagem regenerativa ou absorção de energia do *ICE* quando sua saída for maior que a necessária para acionamento das rodas (Cabezuelo et al., 2017). Logo, essa configuração não necessita de gerador. Além disso, um motor elétrico e o *ICE*

menor pode ser usado para obter o mesmo desempenho até que a bateria se esgote (Cabezuelo et al., 2017). Ao contrário, o sistema torna-se mais complexo devido à necessidade do conjunto planetário-engrenagem. Esta arquitetura *HEV* possui seis modos de operação diferentes.

2.2.1.3. Sistema híbrido série-paralelo

É uma configuração onde há a combinação entre as características tanto da série quanto do paralelo, mas em comparação com a série envolve um link mecânico adicional e em comparação com o paralelo um gerador adicional (Cabezuelo et al., 2017). Embora combine as vantagens de ambas as configurações, é relativamente mais complexo e caro, principalmente em relação ao controle. No entanto, considerando as vantagens nas tecnologias de controle e fabricação, alguns *HEV* modernos adotam este sistema.

2.2.1.4. Sistema híbrido-complexo

O sistema híbrido complexo se assemelha à série-paralelo. A principal diferença é o fluxo de potência bidirecional do motor elétrico, em oposição ao fluxo de potência unidirecional do gerador em série-paralelo (Cabezuelo et al., 2017). Este fluxo de potência bidirecional permite modos de operação versáteis, especialmente as três potências de propulsão (devido ao *ICE* e dois motores elétricos), não disponível na configuração série-paralela. Semelhante ao anterior, o sistema híbrido-complexo apresenta maior complexidade, altos custos e difícil controle.

2.2.1.5. Sistema híbrido Through the Road (TtR)

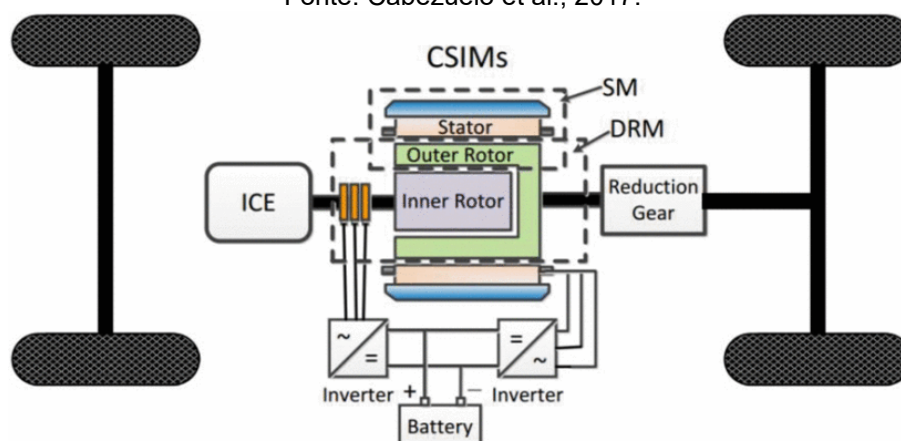
A configuração também é conhecida como *Hybrid4*. É um sistema de propulsão híbrido paralelo nas quatro rodas. O *ICE* traciona um eixo, enquanto o outro é tracionado via motor elétrico (Cabezuelo et al., 2017). Não há conexão mecânica direta entre os dois sistemas de propulsão, mas a ligação é produzida com as rodas e através da estrada. Isso simplifica muito o sistema de engrenagens em comparação com o sistema híbrido-complexo e, além disso, permite converter um veículo convencional com *ICE* em um *HEV* com modificações mínimas.

2.2.1.6. Máquinas integradas de estrutura composta

É uma configuração de transmissão eletromagnética integrada por duas máquinas elétricas na mesma estrutura, com dois eixos de saída mecânicos independentes e duas portas elétricas, conforme ilustrado na Figura 8. Para aplicações automotivas, o sistema *CSIM* (*Compound-Structure Integrated Machines*) é instalado entre o *ICE* e a engrenagem de redução. Comparado a outras configurações, o *CSIM* tem as vantagens de uma estrutura mais compacta e menor peso. O *CSIM* é uma tecnologia pouco desenvolvida, mas nos últimos anos tem sido realizada pesquisa ativa em torno de várias configurações e topologias de *CSIMs* (Cabezuelo et al., 2017).

Figura 8: Configuração dos veículos HEV com o sistema CSIM.

Fonte: Cabezuelo et al., 2017.



2.2.1.7. Níveis de Hibridização

As configurações dos HEV podem ser classificadas dependendo da relação de potência entre o ICE e o motor elétrico. A classificação é dividida nas três categorias a seguir até a versão híbrida completa, conforme o resumo apresentado na Tabelas 3-4, segundo as características ou configurações.

- Micro híbrido (*micro hybrid*): nestes veículos o motor de partida convencional é substituído por um motor de arranque-gerador integrado (*ISG - Integrated Starter-Generator*). Isso fornece uma função de desligamento do ICE quando o veículo está parado. Este sistema é conhecido como *Start/Stop* e pode conseguir pequenas economias de combustível ao conduzir na cidade. O ISG também atua como Frenagem Regenerativa (*Regenerative Braking - RB*), carregando a bateria. No entanto, esta função é limitada.
- Parcialmente híbrido (*mild hybrid*): nesta configuração o ISG é geralmente colocado entre o ICE e a transmissão, e é projetado em forma plana de grande diâmetro com a intenção de substituir o volante de inércia clássico. Isso fornece uma função *Start/Stop* em repouso e *RB* completo. Ao mesmo tempo, auxilia na propulsão do veículo, reduzindo assim o tamanho do ICE.
- Totalmente híbrido (*Full hybrid*): diferentemente dos dois casos anteriores, a potência de propulsão pode ser fornecida apenas pelo ICE, pelo motor elétrico ou por ambos. Em vez de usar um sistema ISG, esses veículos adotam a transmissão continuamente variável (*CVT - Continuously Variable Transmission*) para controlar a regulação e o fluxo de potência dos dois motores de tração. Esses veículos oferecem todas as vantagens da hibridização, incluindo ignição elétrica, sistema *Start/Stop*, frenagem regenerativa e a possibilidade de reduzir o tamanho do ICE. A potência do motor elétrico nestes casos é maior e depende da configuração utilizada (serial, paralela, complexa, etc.). Para uma operação normal é necessário um grande sistema de armazenamento, que pode ter cerca de 1–2 kWh (Cabezuelo et al.,

2017). Estes veículos podem, por sua vez, ser divididos entre *Synergy Hybrid*, focado em eficiência energética e redução de emissões com pequenos *ICEs* e *Power Hybrid* proposto para um melhor desempenho e potência.

Para cada um desses três níveis de hibridização há custo extra para implementar seus sistemas de economia de energia. Os *Micro HEV* apresentam baixa economia de energia e baixos custos de implementação, os *Full HEV* têm as maiores economias de energia e os *Mild HEV* oferecem um compromisso entre economia e custos, conforme o resumo apresentado na Figura 9.

Tabela 3: Classificações das configurações dos HEV.

Fonte: Cabezuelo et al., 2017.

Topology	Micro	Mild	Full	PHEV	EREV
Series	-	-	X	X	X
Parallel	X	X	X	-	-
Series-parallel	-	-	X	X	-
Complex	-	-	X	X	-
TtR	-	-	X	X	-
CSIM	-	-	X	X	-

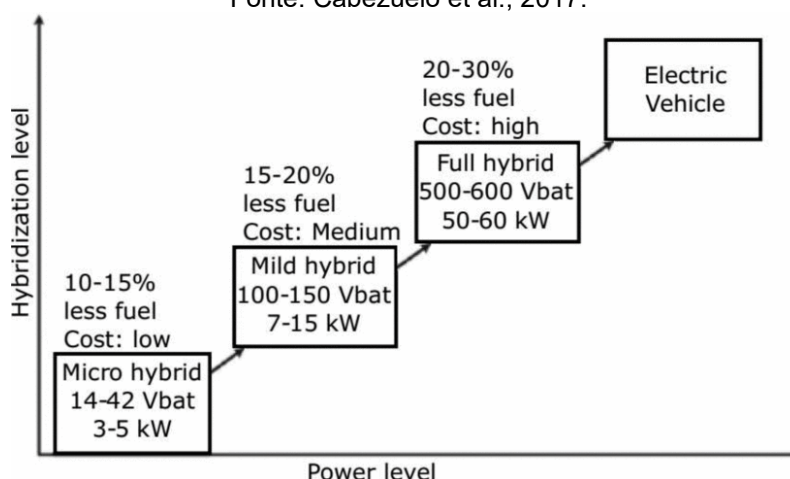
Tabela 4: Características dos níveis de hibridização.

Fonte: Cabezuelo et al., 2017.

Tipo	Start/Stop	Power assist	RB	EV Mode	Charger
<i>Micro</i>	X	-	-	-	-
<i>Mild</i>	X	-	X	-	-
<i>Full</i>	X	X	X	X	-
<i>PHEV</i>	X	X	X	X	X
<i>EREV</i>	X	X	X	X	X

Figura 9: Comparação dos níveis de hibridização, custo e potência.

Fonte: Cabezuelo et al., 2017.



O tempo de condução e a autonomia dos *HEV* no modo integralmente elétrico pode ser limitado, devido à capacidade da bateria que restringe o alcance máximo em termos da distância de deslocamento e não pode ser recarregada de forma externa. Atualmente, existem opções de *Full HEV* que são plug-in (conectáveis à

tomada) e incorporam sistemas de carregamento de baterias via *ICE* (Wu et al., 2015), conforme os detalhes apresentados nos itens a seguir.

- *HEV Plug-in (PHEV)*: têm todas as vantagens de serem recarregados conectados à rede elétrica. Normalmente estão equipados com uma bateria maior, de cerca de 4–5 kWh e uma tensão nominal de 200–300 V. Os *PHEV* podem funcionar em modo elétrico puro (modo de esgotamento de carga) oferecendo uma ampla gama de autonomia, ou em um modo híbrido (modo misto) em que a maior parte da energia é fornecida pela bateria, auxiliada pelo *ICE* para maximizar a economia de combustível. O desempenho energético de um *PHEV* ao circular em modo puramente elétrico pode ser muito alto e com zero emissões quando usado na cidade devido a curtas distâncias (Cabezuelo et al., 2017).
- *HEV Extender Range (EREV)*: estes veículos combinam as virtudes do *PHEV* com as características da configuração série (Cabezuelo et al., 2017). Eles normalmente circulam no modo elétrico e a única função do *ICE* é carregar as baterias, aumentando assim a autonomia do veículo. Comparado ao *PHEV*, os *EREV* têm um *ICE* menor em favor do aumento do tamanho da bateria. Para garantir as condições de condução e autonomia de um *EV*, o motor elétrico precisa atingir 110 kW e a bateria uma capacidade de 16 kWh (Mahmoudi et al. 2014).

Em suma, se o nível de hibridização de um veículo aumenta, ele oferece mais vantagens e otimiza o consumo de combustível. Uma vez atingido o nível *Full HEV*, as performances podem ser melhoradas incorporando um sistema plug-in (*PHEV*) e aumentando a sua autonomia (*EREV*). A disponibilidade de *HEV* no mercado está crescendo, e atualmente seu desenvolvimento segue duas direções. Há uma tendência para a solução *Full Hybrid* apostando na alta eficiência energética e baixas emissões.

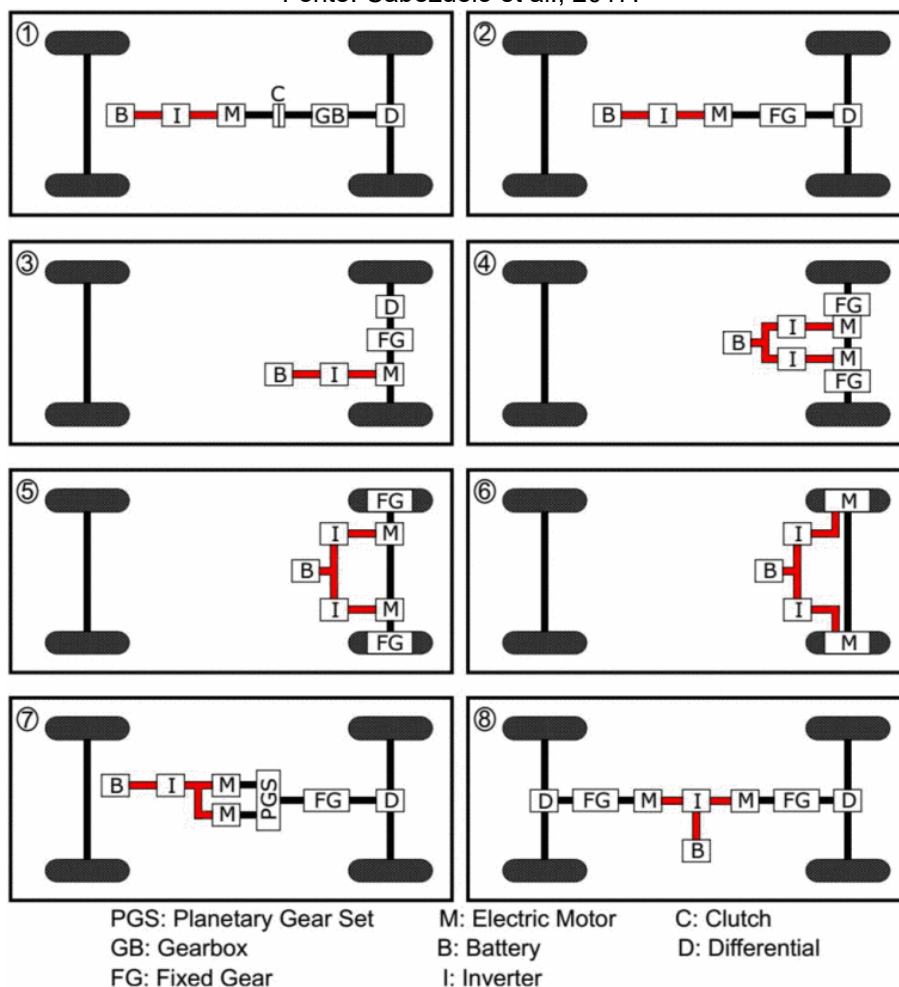
2.2.2. Veículos elétricos

Os *BEVs* são veículos de tração integralmente elétrica, movidos por uma bateria recarregável e o sistema de propulsão é realizado exclusivamente por um motor elétrico, conforme os detalhes apresentados na Tabela 2. A energia vem da eletricidade armazenada na bateria, devendo ser carregada pela rede elétrica (Bauer et al., 2010).

Os sistemas de potência nos *BEV* podem ser divididos em duas categorias: centralizadas (monomotor) e distribuídas (multimáquina) (Cabezuelo et al., 2017). As configurações centralizadas foram as primeiras disponíveis no mercado, pois vêm da mesma configuração do veículo convencional. Ainda têm sido amplamente utilizados, mas, são menos flexíveis. Nos últimos anos, os sistemas de tração multimáquinas têm ganhado a notoriedade (Cui et al., 2014) pela flexibilidade operacional em vários modos e por otimizar o sistema de potência. Na Figura 10 são apresentadas algumas configurações comuns e são detalhadas nos subitens a seguir, com as descrições das configurações de 1-8.

Figura 10: Configuração dos veículos BEV.

Fonte: Cabezuelo et al., 2017.



2.2.2.1. BEV - Configuração 1

A configuração 1, ilustrada na Figura 10, é composta por motor elétrico, embreagem, caixa de câmbio e diferencial e normalmente é usada em adaptações de *ICE* convencional para elétrico, pois permite a conversão alterando uma quantidade mínima de componentes. A embreagem conjugada com o câmbio permite ao condutor alternar entre as diferentes relações de transmissão.

2.2.2.2. BEV - Configuração 2

O conjunto anterior é simplificado e substituí caixa de câmbio por engrenagens fixas, não necessitando de embreagem. Essas modificações são possíveis porque os motores elétricos são capazes de fornecer potência constante em uma ampla faixa de valores de velocidade, permitindo a redução dimensões e o peso do sistema geral.

2.2.2.3. BEV - Configuração 3

Semelhante ao conceito de veículos com o *ICE* de tração dianteira. Composta por motor elétrico, engrenagem fixa e instalado diretamente no eixo acoplado ao acionamento das rodas, simplificando assim o sistema de propulsão.

2.2.2.4. BEV - Configuração 4

Separadas mecanicamente, a ação do diferencial nas curvas pode ser fornecida eletronicamente através de dois motores operando em velocidades diferentes. Neste caso, cada um dos motores possui engrenagens fixas ao lado de cada uma das rodas acopladas ao eixo.

2.2.2.5. BEV - Configuração 5

Para simplificar a transmissão mecânica, o motor elétrico é instalado próximo à roda, também conhecido como *In-Wheel Drive*. Entre o motor e a roda é colocada uma engrenagem fixa, para reduzir a velocidade e aumentar o torque.

2.2.2.6. BEV - Configuração 6

O motor elétrico é conectado diretamente, sem engrenagem fixa, à roda motriz com o objetivo de simplificar a transmissão mecânica do veículo. Isso atinge a eficiência de transmissão ideal e torna a estrutura mais compacta. No entanto, é necessário o uso de motores elétricos de alto conjugado, para acelerar o veículo em baixas velocidades.

2.2.2.7. BEV - Configuração 7

Trata-se de uma configuração centralizada multimáquina, na qual são utilizados dois motores elétricos diferentes através de um conjunto de engrenagens planetárias (Cui et al., 2014). Neste sistema, um dos motores é para altas velocidades e o outro para altos torques. Assim, é possível atingir altas velocidades com baixos conjugados e vice-versa. Além disso, são otimizadas a região de operação e é alcançada maior eficiência energética.

2.2.2.8. BEV - Configuração 8

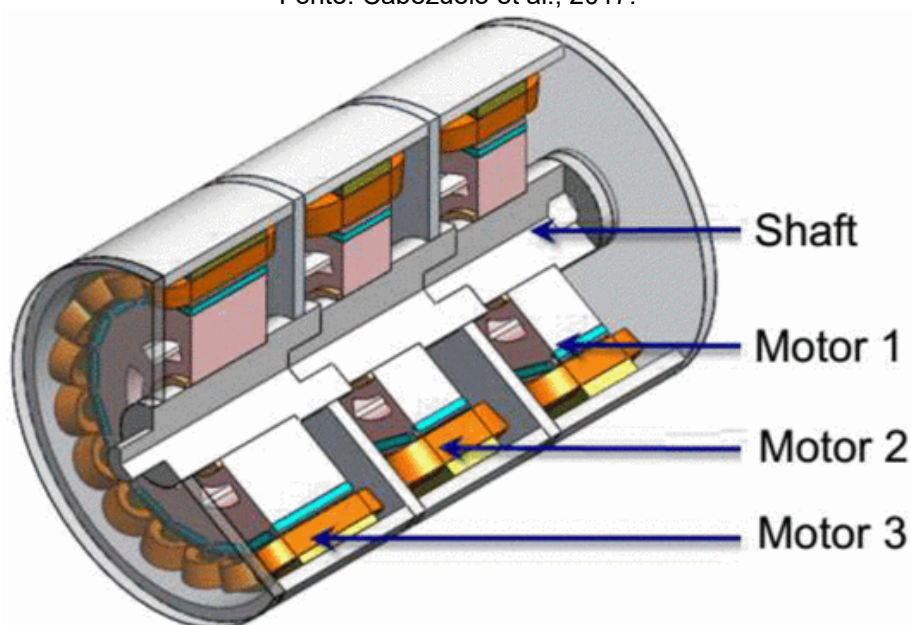
É uma configuração distribuída multimáquina, na qual os dois eixos são acoplados separadamente. Apresenta o desempenho dinâmico, melhor conforto de condução e maior flexibilidade no desenvolvimento estrutural (Cui et al., 2014), uma vez que cada um dos eixos pode ser tracionado e controlado de forma independente. Além disso, a demanda de potência pode ser dimensionada adicionando mais motores ao sistema e até evoluir para uma tração nas quatro rodas.

Além disso, há estudos em torno de um novo sistema de *Modular Cascade Machines (MCM)*, ilustrado na Figura 11, visando a otimização da eficiência, aumentar a tolerância a falhas e facilitar a manutenção dos sistemas de tração, entre outros (Cui et al., 2014). O *MCM* é um sistema *multimáquina* onde os motores são acoplados em série como uma bateria (Cabezuelo et al., 2017). As características mais notáveis do sistema *MCM* são:

- Projeto modular da unidade do motor, sendo capaz de reduzir os custos de P&D, fabricação e manutenção.
- Desenvolvimento integralmente adaptado ao sistema e às características específicas do *HEV*. Poder adaptar, por exemplo, um módulo para alto torque em baixa rotação, outro para alta rotação em baixo torque e outro para atingir alta eficiência em uma faixa específica de torque-velocidade.
- Tolerância a falhas, pois o *MCM* pode ser considerado como um sistema redundante. Como cada unidade motora pode operar independentemente, permite excluir do sistema qualquer unidade com falha, para continuar trabalhando.

Figura 11: Vista de uma máquina modular em cascata.

Fonte: Cabezuelo et al., 2017.



2.2.3. Veículos elétricos de célula de combustível

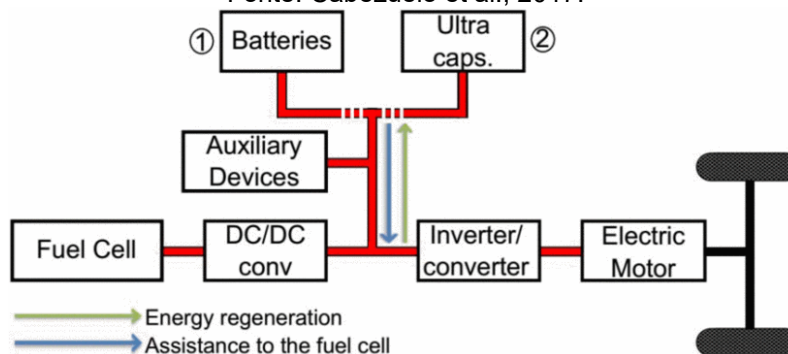
Nos *FCV* (*FCEV – Fuel-Cell Electric Vehicles*), as células de combustível geram energia elétrica para alimentar o veículo ou para acumular em um sistema de armazenamento, uma bateria ou ultracapacitores. As células a combustível mais utilizadas são as de Membrana Polimérica Eletrolítica (*PEM - Polymer Electrolyte Membrane*). Essas células utilizam o hidrogênio armazenado como combustível e o oxigênio do ar e, por sua reação eletroquímica, geram eletricidade (Cabezuelo et al., 2017). Considerando que não há ação térmica ou mecânica nesse processo, esses dispositivos atingem eficiências superiores aos *ICEs*, conforme apresentado na Tabela 2.

A energia gerada nas células de combustível depende da quantidade de unidades e de suas dimensões. Além disso, essas células, além de fornecer eletricidade, geram água e calor. E com um sistema de cogeração maior eficiência pode ser alcançada (Ehsani, 2009, Cabezuelo et al., 2017).

Existem duas maneiras principais de usar células de combustível nesses veículos, conforme a Figura 12, isto é, puramente elétrico ou baseado na arquitetura híbrida, conforme descrições a seguir.

Figura 12: Configuração dos veículos FCEV.

Fonte: Cabezuelo et al., 2017.



2.2.3.1. Arquitetura puramente elétrica

Apenas a célula de combustível é usada como fonte de energia. Há um conjunto de ultracapacitores para uma regulação eficiente da energia. Isso se justifica pelo fato de a bateria ser capaz de fornecer adequadamente energia em regime permanente, mas é pouco adequada às demandas instantâneas (picos) de potência. Honda FCX e Daimler Chrysler são exemplos de aplicações da arquitetura.

2.2.3.2. Arquitetura híbrida

Neste caso, as células funcionam como carregador de bateria, enquanto as baterias suportam picos de potência e permitem um melhor desempenho das células a combustível. Protótipos da Toyota e Honda FCX Clarity funcionam com esta topologia. Esta solução tem a vantagem de que a maioria dos utilizadores percorre menos de 30 km por dia, o que equivale à autonomia da bateria. Este tipo de veículo poderia ser utilizado como transporte diário, recarregando-o com hidrogênio apenas para viagens mais longas (Cabezuelo et al., 2017).

Existem muitas outras tecnologias, tais como: células de combustível alcalinas, células de ácido fosfórico, células de carbonato fundido e células de combustível de óxido sólido (*SOFC - Solid Oxide Fuel-Cells*). No entanto, devido as questões térmicas, alta densidade de potência em tamanhos relativamente pequenos, estrutura e armazenamento simples e robustez contra colisões e vibrações, as células *PEM* estão ganhando campo em aplicações automotivas. Em contrapartida, esta tecnologia apresenta alguns problemas como a necessidade de catalisadores de metais preciosos, elevando significativamente os preços do sistema. Além disso, o combustível deve ter uma concentração de monóxido de carbono (CO) inferior a 10 ppm, para mitigar a deterioração das células (Cabezuelo et al., 2017).

2.2.4. Audi e-tron

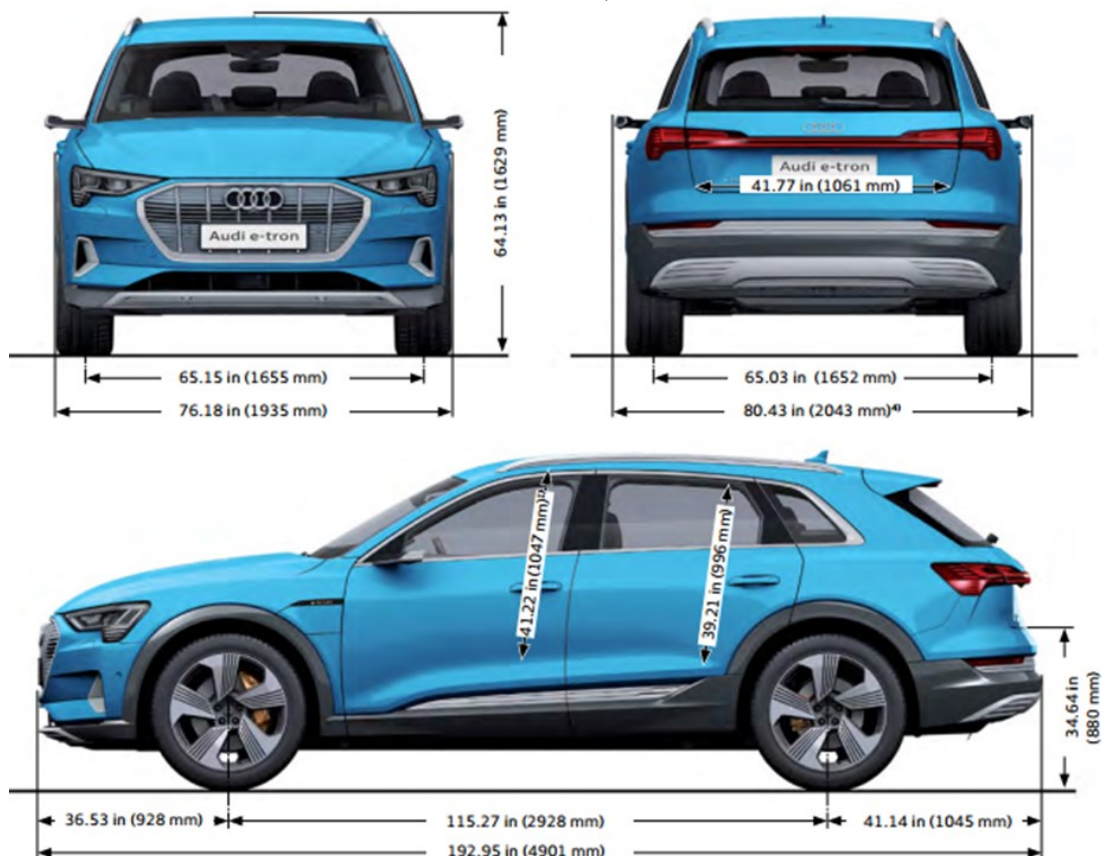
2.2.4.1. Características técnicas gerais

Os estudos deste trabalho usaram o *BEV*, modelo “e-tron” de 2019, desenvolvido e fabricado pela Audi, com base nas informações públicas e disponíveis da montadora *OEM* (*OEM - Original Equipment Manufacturer*).

A Audi apresentou em 2019 seu primeiro modelo *SUV* (*Sport Utility Vehicle*) *full-size* de produção em série totalmente elétrico, o Audi e-tron, ilustrado nas Figuras 13 e 14. Seus dois motores elétricos, juntamente com a tração elétrica nas quatro rodas, ilustrado na Figura 15, proporcionam alto desempenho (NHTSA, 2022), livre de emissões de poluente, baixos níveis de ruído, com uma potência do sistema de até 300 kW (408 cavalos) e 664 Nm (489,7 lb-ft) de torque (Audi, 2021). O veículo é produzido na Bélgica, em Bruxelas, a primeira unidade de produção em volume certificada neutra na emissão de CO₂ do mundo no segmento premium.

Figura 13: Audi e-tron – principais dimensões.

Fonte: NHTSA, 2022.



A nova geração *quattro* – tração elétrica nas quatro rodas – oferece tração e direção superlativos em qualquer terreno e em quaisquer condições climáticas. Ele garante a regulação contínua e totalmente variável da distribuição ideal do torque de acionamento entre os dois eixos - em uma fração de segundo. Na maioria dos casos, o *SUV* elétrico tende a usar seu motor elétrico traseiro para obter a maior eficiência (NHTSA, 2022). O torque máximo de acionamento está disponível em frações de segundo, acelera de 0-100 km/h em 5,7 segundos e a velocidade máxima é de 200 km/h, limitada eletronicamente.

Figura 14: Audi e-tron – resumo das dimensões internas e externas.

Fonte: NHTSA, 2022.



Exterior dimensions and weights

Length	192.95 in (4901 mm)
Width (not including mirrors)	76.18 in (1935 mm)
Width (including mirrors)	80.43 in (2043 mm) ⁴⁾
Height	64.13 in (1629 mm)
Front track	65.15 in (1655 mm)
Rear track	65.03 in (1652 mm)
Wheelbase	115.27 in (2928 mm)
Unladen weight	5654.85 lb (2565 kg)
Maximum gross weight	6922.50 lb (3140 kg)
Drag coefficient	0.27 ⁵⁾

Interior dimensions and other specifications

Front cabin width	60.90 in (1547 mm) ²⁾
Front shoulder width	58.62 in (1489 mm) ³⁾
Rear cabin width	59.99 in (1524 mm) ²⁾
Rear shoulder width	57.24 in (1454 mm) ³⁾
Through-loading width	41.77 in (1061 mm)
Load sill height	31.49 in (800 mm)
Luggage compartment capacity	21.88 cu ft (600 l)
Front storage compartment	2.11 cu ft (60 l)

¹⁾ Maximum headroom

²⁾ Elbow room width

³⁾ Shoulder room width

⁴⁾ Vehicle width with exterior mirrors + add 146 mm

⁵⁾ 0.28 with exterior mirrors

2.2.4.2. Sistema de propulsão elétrica

O veículo possui uma unidade de acionamento elétrica para os eixos dianteiro e traseiro. A distribuição do torque de acionamento e recuperação entre as unidades é controlada por módulo de controle propulsor/motor, ou seja, recebe as demandas de torque de outras unidades de processamento e demanda para que possa gerenciar o acionamento e a recuperação com base na tração necessária, dadas as condições dinâmicas. A rápida resposta dos motores elétricos pode ser usada vantajosamente para a distribuição de torque entre os eixos dianteiro e traseiro. Eles podem reagir à mudança de atrito nas rodas em uma fração de segundo. O bloqueio eletrônico do diferencial e o controle seletivo de torque das rodas regulam a distribuição da potência de tração entre as rodas de um eixo e, assim, melhoram a tração e a dinâmica de direção (Audi, 2021, 2022 e NHTSA, 2022). As curvas de conjugado, potência e velocidade dos motores elétricos podem ser consultadas nas Figuras 17 e 18.

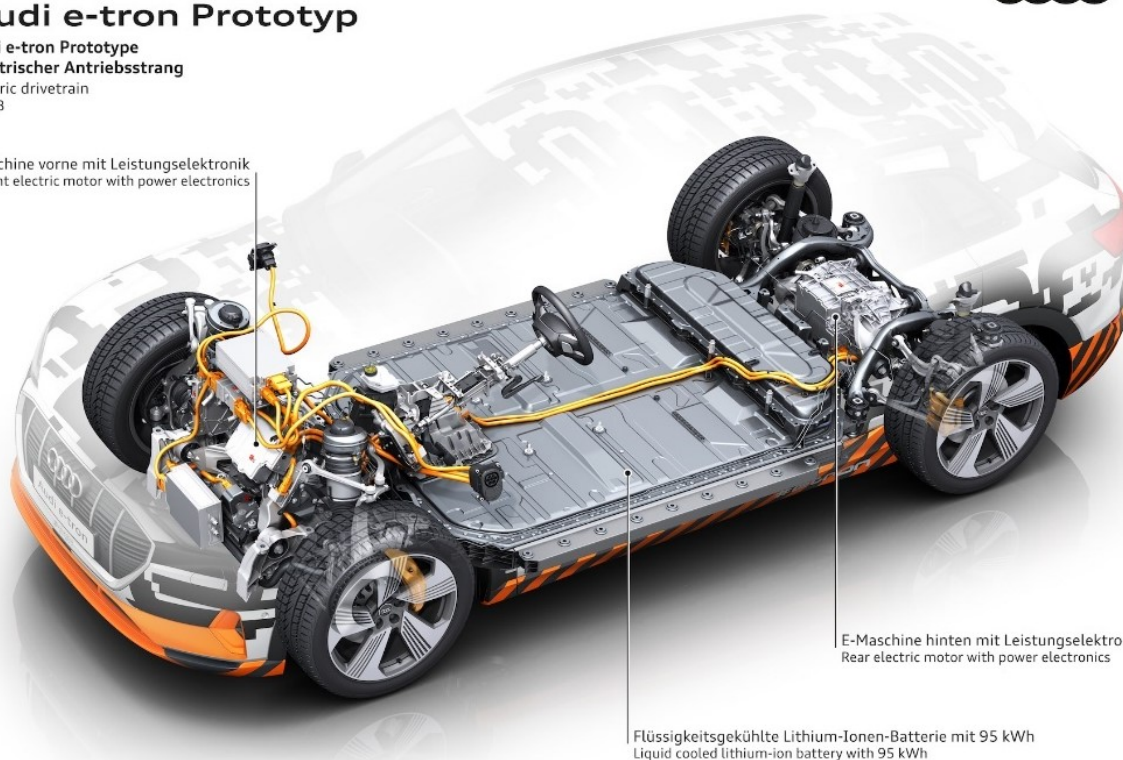
No modo de acionamento elétrico, a unidade eletrônica de potência converte a corrente c.c. da bateria de alta tensão em uma corrente trifásica alternada (corrente c.a.), conforme mostrado no esquema da Figura 16. A conversão é realizada por meio de modulação de largura de pulso (*PWM - Pulse Width Modulation*).

Figura 15: Motores elétricos do Audi e-tron.
Fonte: Audi, 2022.

Audi e-tron Prototyp

Audi e-tron Prototype
Elektrischer Antriebsstrang
Electric drivetrain
04/18

E-Maschine vorne mit Leistungselektronik
Front electric motor with power electronics

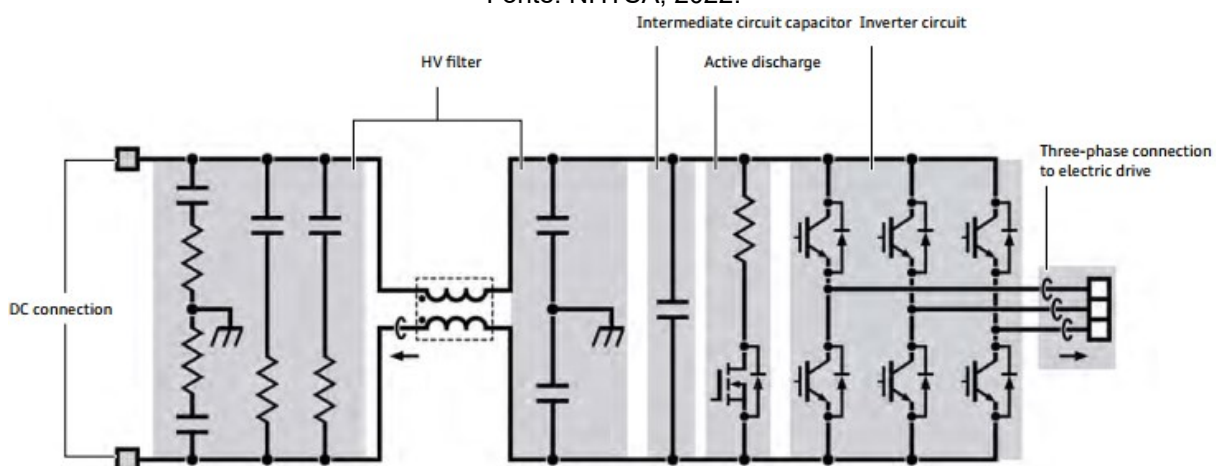


E-Maschine hinten mit Leistungselektronik
Rear electric motor with power electronics

Flüssigkeitsgekühlte Lithium-Ionen-Batterie mit 95 kWh
Liquid cooled lithium-ion battery with 95 kWh

Quanto maior a frequência, maior a velocidade. Quanto maior o tempo de ativação do sinal PWM, maior o torque.

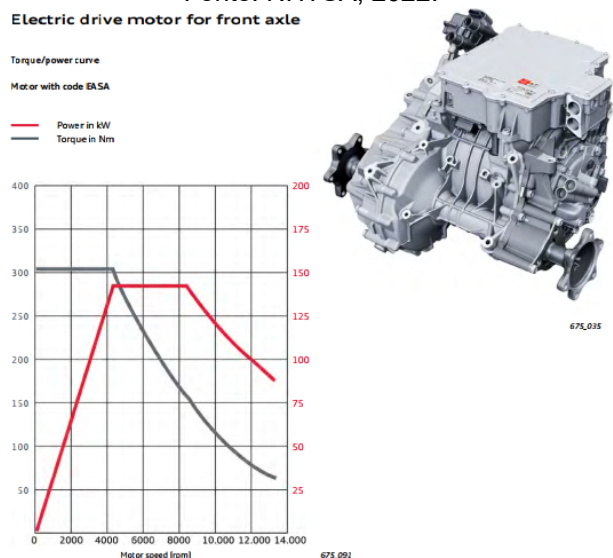
Figura 16: Circuito elétrico de acionamento e conversão de energia do Audi e-tron.
Fonte: NHTSA, 2022.



A velocidade é regulada alterando a frequência, enquanto o torque dos motores elétricos de acionamento do eixo dianteiro e traseiro é regulado alterando os tempos de ativação das larguras de pulso individuais. Por exemplo, em corrente alternada, a frequência de 33,34 Hz é necessária para atingir uma velocidade de rotação do campo magnético de 1000 rpm em um motor assíncrono com dois pares de pólos (NHTSA, 2022). Devido ao escorregamento do motor assíncrono, o rotor gira correspondentemente mais lento.

Figura 17: Curva característica do motor elétrico dianteiro.

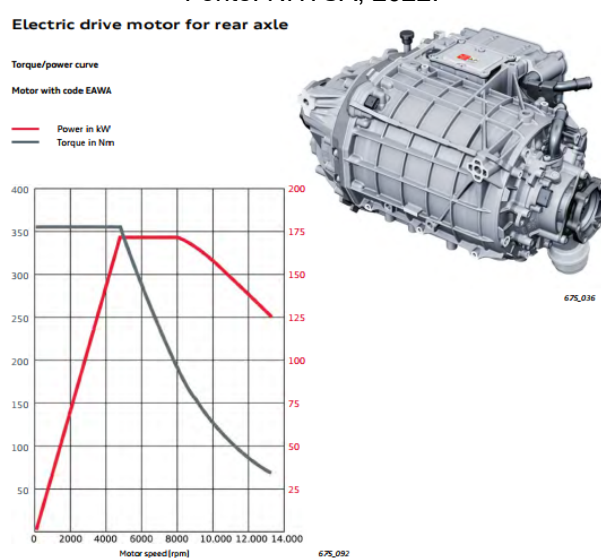
Fonte: NHTSA, 2022.



Features	Technical data
Motor code	EASA
Type	Parallel-axis asynchronous motor
Type of rotor	Internal rotor
Cooling	Water cooling
Coolant	G12evo
Voltage rating (DC)	360 Volt
Continuous power output (30 min) in kW at 7,000 rpm	70
Peak power output (10 sec) in kW	135
Torque in Nm at continuous power output (30 min)	95
Torque in Nm at peak power output (10 sec)	309

Figura 18: Curva característica do motor elétrico traseiro.

Fonte: NHTSA, 2022.



Features	Technical data
Motor code	EAWA
Type	Coaxial asynchronous motor
Type of rotor	Internal rotor
Cooling	Water cooling
Coolant	G12evo
Voltage rating (DC)	360 Volt
Continuous power output (30 min) in kW at 7,000 rpm	95
Peak power output (10 sec) in kW	165
Torque in Nm at continuous power output (30 min)	130
Torque in Nm at peak power output (10 sec)	355

2.2.4.3. Acumulador de energia: bateria

A Audi, montadora premium do grupo Volkswagen tem uma estratégia de múltiplos fornecedores de células das baterias. Isso significa que a montadora usa também diferentes fornecedores de células de íons de lítio para diferentes baterias.

Os fornecedores também mudaram desde que o e-tron foi lançado ao mercado mundialmente.

A célula usada no e-tron antes de janeiro de 2021 é a LG Chem E66A. O tipo de célula é LG Pouch Cell produzido na Polônia (Electricshgoneaudi.net, 2022).

A bateria do Audi (e-tron 55/e-tron 60S) dispõe 95 kWh, a tensão nominal são 396 V (Volts), conforme os detalhes apresentados na Tabela 5 e é composto por 36 módulos com 12 células cada, totalizando 432. As células em cada módulo são conectadas na configuração 4p3s (4 células conectadas em paralelo e três conjuntos de células ligados em série). Ou seja, de quatro em quatro células são agrupadas em paralelo e depois conectadas em série, conforme o esquema ilustrado na Figura 19.

Figura 19: Diagrama de conexão do módulo 95 kWh com configuração 4p3s.

Fonte: Electricshgoneaudi.net, 2022.

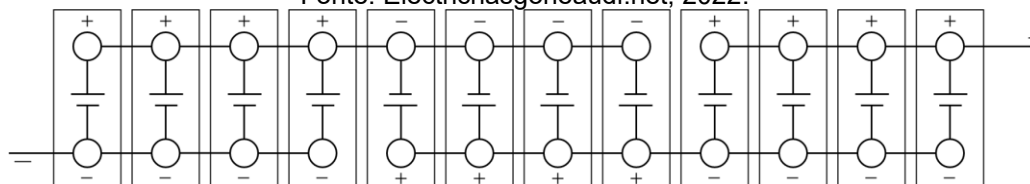


Tabela 5: Descrições técnicas da bateria de alta tensão do e-tron.

Fonte: NHTSA, 2022.

Descrições:	High-voltage Battery 1 AX2
Tensão Nominal:	396 V
Capacidade em Ah (ampères-hora):	240 Ah
Número de células da bateria:	432 em 36 módulos
Temperatura de operação:	-28 até 60 °C
Energia disponível:	95 kWh
Energia útil disponível ¹ :	83,6 kWh
Capacidade de carga:	150 kW
Peso:	699 kg
Dimensões aproximadas em mm:	1630 x 340 x 2280 (largura x altura x comprimento)
Arrefecimento ² :	Fluído de arrefecimento
¹ : Com níveis de carga reais entre 8 % e 96 % - O nível de carga mostrado ao motorista apresenta se a bateria está descarregada ou totalmente carregada	
² : Quando necessário em baixas temperaturas, a bateria também pode ser aquecida.	

Cada célula tem 60 Ah. Logo, cada grupo paralelo dá uma capacidade de 240 Ah (4 x 60 Ah). Quando 36 módulos como este são conectados em série a tensão nominal são 396 V (Volts). Ou seja, 396 V multiplicado por 240 Ah = 95.040 Watt-hora (Wh) ou 95 kWh (quilo Watt-hora).

O módulo unitário possui 11 V. Desta maneira, 240 Ah x 11 V = 2640 Wh ou 2,64 kWh.

O peso de cada um dos módulos são aproximadamente 13 kg. Portanto, o peso total da bateria são 1532,2 lb (699,99 kg).

Os veículos produzidos antes da semana 47, em 2019, possuem uma bateria com a capacidade nominal de 83,6 kWh. A bateria possui a descrição AX2. Já os modelos manufaturados depois deste período (*clean point*), o *buffer* foi reduzido para a substituição para o novo modelo, e assim, a capacidade disponível foi majorada para 86,5 kWh aumentando o alcance em 3,4 %.

O módulo de controle de bateria de alta tensão é instalado internamente na bateria de alta tensão, conforme croqui da Figura 20, junto às unidades de controle do módulo de bateria. As especificações e os dados técnicos da bateria podem ser consultados na Tabela 6.

A bateria de alta tensão é fixada centralmente sob o veículo como um componente de suporte da carroceria. Os 36 módulos de bateria são instalados em dois níveis. O compartimento da bateria é conectado ao corpo por meio de uma linha de equalização de potencial ativo (NHTSA, 2022).

2.2.4.4. Recarga da bateria do Audi e-tron

Os veículos elétricos são mais eficientes do que veículos a combustão pois, 100 km em um veículo elétrico podem ser alcançados com aproximadamente 20 kWh e os mesmos 100 km no motor a combustão deve consumir cerca de 10 litros de gasolina. Neste sentido, é recomendável verificar pontualmente o custo do kWh de cada localidade e o valor do combustível para se chegar a uma resposta mais precisa. Em linhas gerais a economia fica em torno de 70% para o veículo elétrico (Audi, 2021).

Recarregar o equivalente a uma bateria por semana representa o consumo de 95 kWh, ou seja, no total serão 380 kWh para carregar o veículo durante 4 semanas. É importante frisar que o aumento do consumo de energia residencial

deve ficar muito distante do custo pago pelo cliente para abastecer o veículo com gasolina.

Figura 20: Bateria de alta tensão do e-tron.

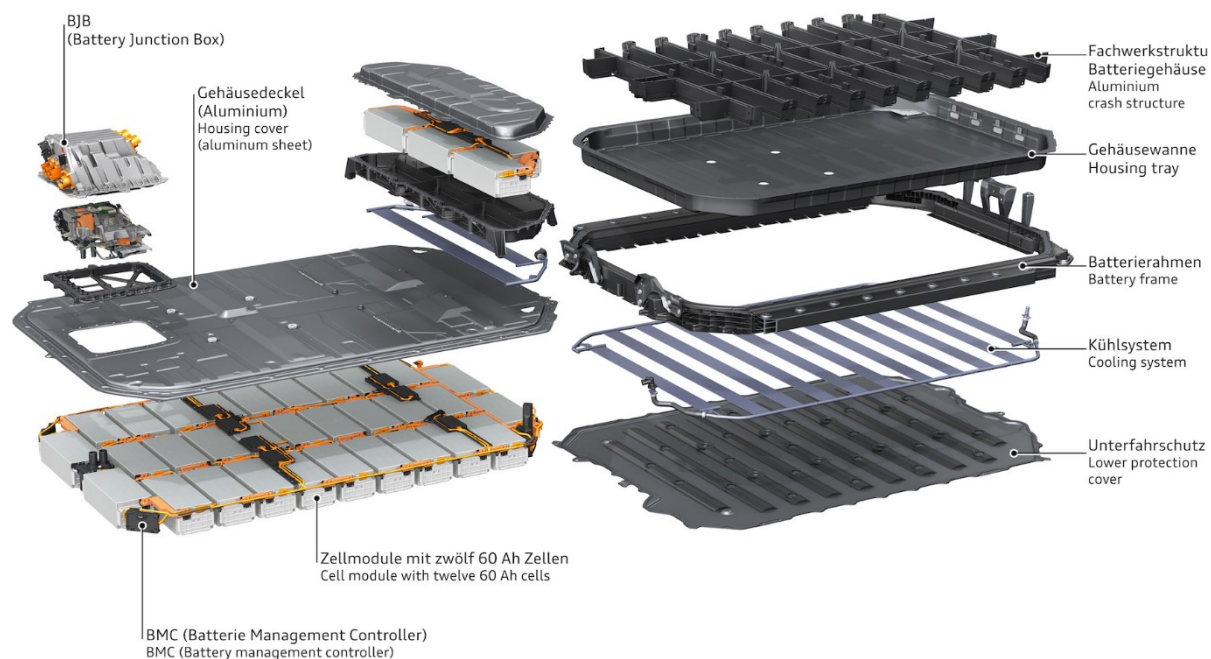
Fonte: NHTSA, 2022.



Audi e-tron Prototyp

Audi e-tron Prototyp
Flüssigkeitsgekühlte Lithium-Ionen-Batterie

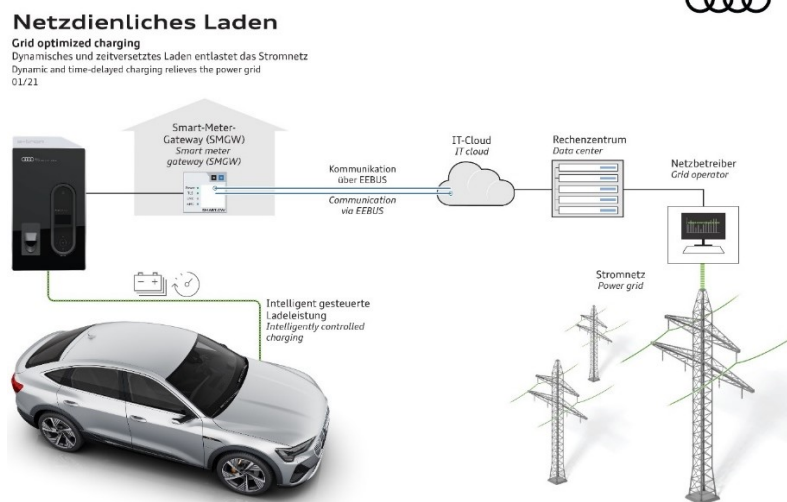
Liquid cooled lithium-ion battery
04/18



Hoje está vigente no Brasil a Tarifa Branca na qual os clientes podem optar por aderir. Na Tarifa Branca o custo do kWh se torna mais caro nos horários de pico e mais barato nos horários fora de pico. O início e término do horário de pico depende da localidade. De acordo com o fabricante, a Audi, o veículo está adaptado para operações inteligentes quando conectado à rede elétrica, conforme a ilustração da Figura 21.

Figura 21: Conexão do BEV à rede elétrica para a recarga inteligente.

Fonte: Audi, 2022.



A autonomia dos veículos elétricos é mensurada de acordo com as premissas do ciclo *WLTP*. A abreviação *WLTP* significa *Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicle Test Procedure* e consiste num teste que calcula os valores do consumo e dos gases do sistema de exaustão de um veículo num banco de ensaio. Desde primeiro de setembro de 2017, o *WLTP* passa a ser exigido progressivamente, substituindo o *NECC*, o anterior processo de teste. Graças ao seu alinhamento dinâmico, o *WLTP* aproximou-se agora de modo claro da condução real.

O *WLTP* caracteriza-se por acelerações bastante superiores, bem como por um perfil de condução que é notoriamente mais dinâmico. A velocidade máxima aumentou para 131 km/h e a velocidade média aumentou para 47 km/h. O tempo de marcha prolongou-se por mais 10 minutos, a proporção de percursos em autoestrada recriados nos rolos aumentou e, ao mesmo tempo, os tempos de imobilização reduziram. Os percursos de condução duplicaram em 23 km. Os pontos de acionamento são calculados preliminarmente em função do veículo e da cadeia cinemática.

Todos os equipamentos opcionais que influenciam a aerodinâmica do veículo, a resistência ao rolamento ou as dimensões do veículo, passam no futuro a influenciar a avaliação. O consumo de energia elétrica das funções de conforto provoca também um acréscimo nos valores de CO₂. O ar-condicionado é a única exceção na primeira fase do *WLTP*. Com o *WLTP* será incorporado um padrão vinculativo mundialmente. Os países da UE (União Europeia) assumem a liderança. Isto ajuda na comparação do consumo de combustível e as emissões de substâncias poluentes de veículos de diferentes fabricantes. Estes padrões contribuem ainda para que as autoridades possam verificar o cumprimento dos valores limite legais relativos aos gases de escape – desde os hidrocarbonetos (HC) passando pelo monóxido de carbono (CO), pelo óxido de hidrogênio (NOx), até às partículas (Mercedes-Benz, 2022).

A recarga da bateria dos *BEV* e-tron da Audi, procede às especificações preconizadas pelo fabricante, conforme a Tabela 1. A releitura da Tabela 1 é apresentada na Tabela 6, para a compreensão das especificações de recarga em função dos tempos, potências e estado de carga.

Tabela 6: Tempo e energia para a recarga de um *BEV*, reedição da Tabela 1.

Fonte: Audi Brasil, 2020.

P [W]	t [h]	E [kWh]	Recarga da bateria (kW)	Distância total (km)	Estado de carga da bateria [%]
2200	0,5	1100	1,1	5	1,18
2200	1	2200	2,2	10	2,35
7200	0,5	3600	3,6	17	3,85
11000	0,5	5500	5,5	25	5,88
7200	1	7200	7,2	33	7,70
2200	4	8800	8,8	40	9,41
11000	1	11000	11	50	11,76
2200	6	13200	13,2	60	14,12
2200	8,5	18700	18,7	86	20,00
7200	4	28800	28,8	132	30,80
7200	6	43200	43,2	198	46,20
11000	4	44000	44	201	47,06
7200	8,5	61200	61,2	280	65,45
11000	6	66000	66	302	70,59
11000	8,5	93500	93,5	429	100,00

Após a nova tabulação dos dados da Tabela 1 na Tabela 6 foi gerada a Figura 22 para a compreensão dos dados relativos ao estado de carga da bateria em função da autonomia e da capacidade. E então, foi observada as tendências lineares entre as variáveis relativas ao desempenho do veículo. Neste sentido, a Figura 23 apresenta os dados, considerando as características lineares e as respectivas regressões geradas a partir dos dados do fabricante.

Figura 22: SoC vs. autonomia vs. capacidade nominal.

Fonte: Audi, 2021.

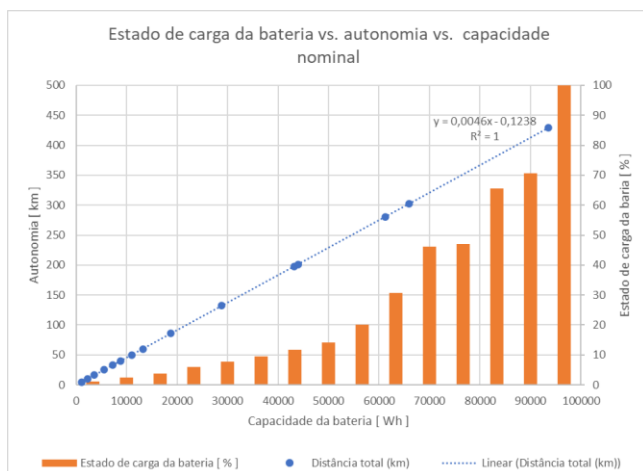
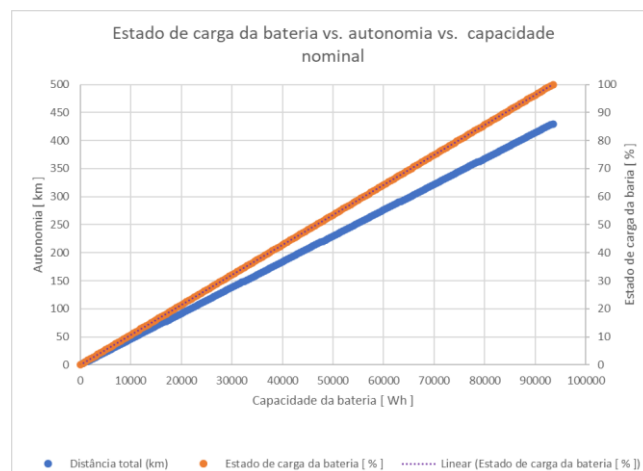


Figura 23: Soc vs. autonomia vs. capacidade nominal – linearização.



3. GERADORES FOTOVOLTAICOS E MICRORREDES

3.1. Geradores fotovoltaicos

A transformação da energia contida na radiação luminosa em energia elétrica é um fenômeno físico conhecido como efeito fotovoltaico. Observado primeiramente pelo físico francês Edmond Becquerel em 1839, o efeito é observável em materiais semicondutores com capacidade de absorver a energia contida nos fótons presentes na radiação luminosa incidente, transformando-a em eletricidade. A energia absorvida por esses materiais quebra as ligações químicas entre as moléculas presentes em suas estruturas. Com isso, cargas elétricas são liberadas e podem ser utilizadas para a realização de trabalho. O efeito fotovoltaico é uma característica física intrínseca ao material que compõe os dispositivos de conversão fotovoltaica (Zilles et al., 2012). A Figura 24 ilustra o processo de conversão fotovoltaica com o aproveitamento da corrente fotogerada.

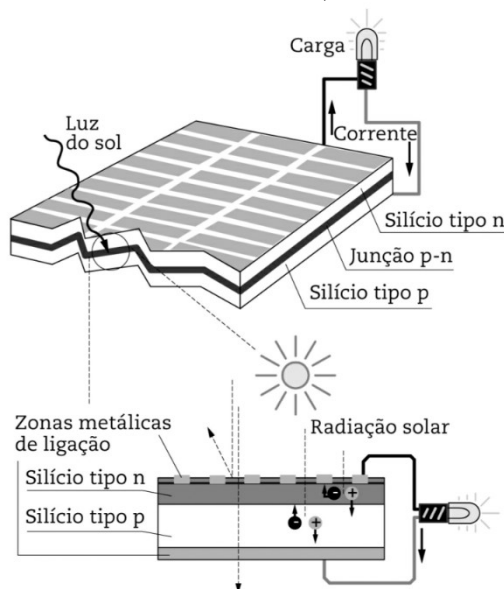
A célula fotovoltaica é um dispositivo que converte a energia solar em energia elétrica com características peculiares diferindo-as das tradicionais fontes de energia. O efeito fotovoltaico ocorre quando a célula é exposta à radiação solar e o aproveitamento desse efeito é consolidado por meio do campo elétrico da junção p-n e de um circuito elétrico externo. Se a célula não estiver conectada a nenhuma carga, aparecerá em seus terminais, quando iluminada, uma tensão chamada de tensão de circuito aberto. Por outro lado, se a célula estiver conectada a uma carga, haverá circulação de corrente no circuito formado entre a carga e a célula.

Assim, é possível representar a célula a partir de seus parâmetros elétricos de saída (tensão e corrente) em função de fatores que influenciam na entrada (irradiância e temperatura da célula). As características elétricas primordiais de um

módulo fotovoltaico, assim como em qualquer gerador elétrico, são a potência nominal, a tensão e a corrente. O valor da máxima potência de um módulo sob as condições padrão de teste (*STC - Standard Test Conditions*) é fornecido pelo fabricante como informação de placa. As condições padrão de teste (ou condições de referência) são definidas para os valores de 1.000 W/m^2 de irradiância, $25 \text{ }^\circ\text{C}$ de temperatura de célula e *AM (air mass) = 1,5* para a massa de ar (Zilles et al., 2012).

Figura 24: Representação do processo de conversão fotovoltaica.

Fonte: Zilles et al., 2012.



As características entre a tensão e a corrente, doravante curva $V \times I$, da célula fotovoltaica não são lineares e são sensíveis as variações térmicas e de irradiação. A curva de $V \times I$, mostrada na Figura 25, permite determinar a relação entre a potência e a tensão ($P \times V$), conforme a Figura 26. Na Figura 26 é possível notar a corrente de curto-circuito ($0, I_{SC}$), tensão de circuito aberto ($V_{SC}, 0$) e o ponto de máxima potência (*MPP*), dado pelas variáveis (V_{max}, I_{max}) e duas áreas definidas onde é possível observar a operação em corrente constante, à esquerda do *MPP*, da célula fotovoltaica (Brandão, 2013).

Figura 25: Exemplo de uma curva característica $V \times I$ de uma célula fotovoltaica.

Fonte: Brandão, 2013.

Curva característica I-V

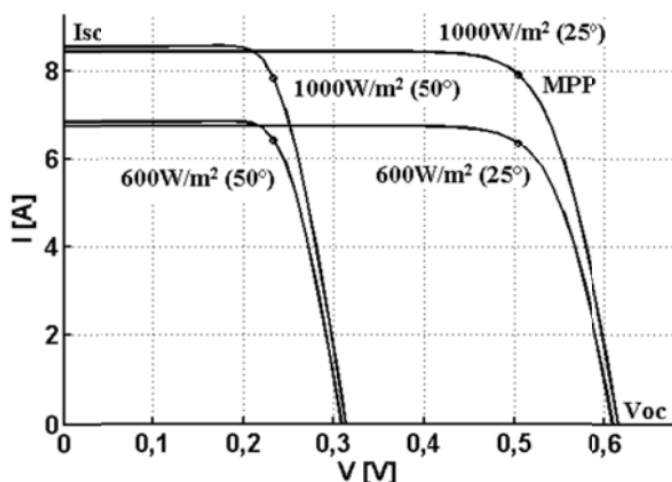
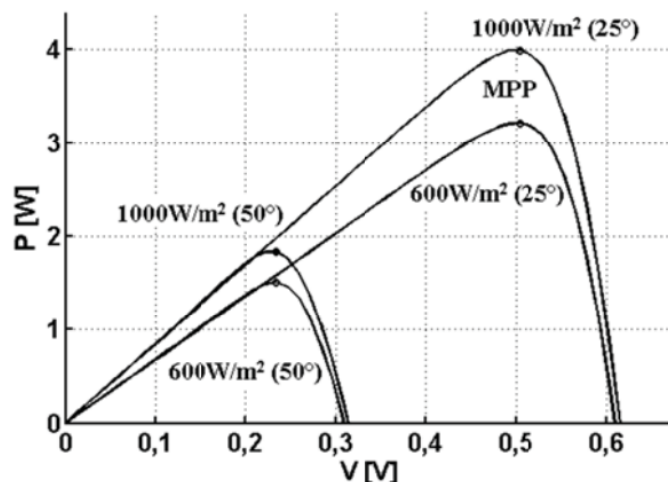


Figura 26: Exemplo de uma curva característica $V \times P$ de uma célula fotovoltaica.

Fonte: Brandão, 2013.

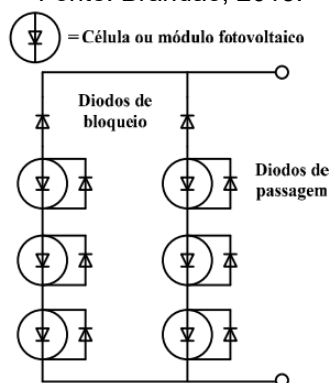
Curva característica P-V



Os módulos estão suscetíveis a danos e a eficiência do sistema, composto de várias configurações série ou paralelo, em condições de operação desigual de irradiação do módulo ou entre os módulos, dadas as configurações sistêmicas ou intrínsecas. Neste sentido, é essencial a utilização de diodos de passagem e de bloqueio. O diodo de passagem, diodo em antiparalelo com o dispositivo fotovoltaico (célula ou módulo), é usado para evitar que uma associação série seja limitada pelo dispositivo com menor incidência de irradiação solar. E o diodo de bloqueio, diodo em série, impede a circulação de corrente reversa através das cadeias associadas em paralelo (Brandão, 2013), conforme ilustrado na Figura 27.

Figura 27: Associações de dispositivos fotovoltaicos com diodo de bloqueio.

Fonte: Brandão, 2013.



A criação de múltiplos pontos de máximo na curva P_xV , denominados máximos locais, é uma das consequências do sombreamento parcial dos módulos fotovoltaicos.

Há soluções de algoritmos de rastreamento de máxima potência global denominados *MPPT* (*maximum power point tracking*) e a ocorrência de múltiplos máximos locais dificulta o rastreamento e a otimização do sistema (Brandão, 2013).

Como a irradiância do sol não é uniforme, é desejável extrair energia ao máximo, em todos os momentos. A faixa de tensão de saída do módulo fotovoltaico é deficiente quando comparada com a demanda de tensão de pico em corrente alternada (c.a.) (Kolantla et al, 2020). Portanto, a tensão precisa ser aumentada e invertida. Para aumentar a tensão, uma conexão em série (S) de módulos fotovoltaicos é uma das soluções, mas isso reduz a confiabilidade e a eficiência em uma conexão paralela (P). Assim, as unidades de controle são usadas para fornecer funcionalidades, como aumento de tensão (conversor *step-up* de corrente contínua (c.c.-c.c.)), rastreamento de ponto de potência máxima (*MPPT*) e inversão, conforme o esquema ilustrado na Figura 28.

A Figura 28 apresenta o diagrama de blocos do sistema fotovoltaico conectado à rede, onde um conversor c.c.-c.c. é responsável por operar no MPP incorporando um algoritmo *MPPT* apropriado no controlador *MPPT*. Ao usar um conversor de energia, o sistema fotovoltaico é conectado e sincronizado à rede. A tensão, fase e frequência do sistema fotovoltaico devem ser equalizadas aos parâmetros da rede através de uma unidade de controle para integração. Quando a energia não está disponível no sistema fotovoltaico, ela poderá ser extraída da rede de distribuição central interconectada. Essa se torna a principal vantagem dos sistemas conectados à rede (Kolantla et al., 2020).

Dependendo da aplicação, o sistema fotovoltaico pode variar de um único módulo a uma matriz. Isso definirá a faixa de potência do sistema fotovoltaico, bem

como a potência nominal do inversor necessária para integração com a rede. A faixa de potência pode variar de alguns watts (W) a quilowatts (kW) ou ainda megawatts (MW). Diferentes sistemas fotovoltaicos têm diferentes capacidades de processamento de energia e com base nisso as arquiteturas fotovoltaicas solares são classificadas conforme mostrado na Figura 29, onde (a) Inversor central, (b) Inversor String, (c) Inversor Multi String e (d) Micro inversor. As principais características de cada uma das arquiteturas são apresentadas nos subitens a seguir.

Figura 28: Diagrama de blocos do sistema fotovoltaico conectado à rede típico.

Fonte: Kolantla et al., 2020.

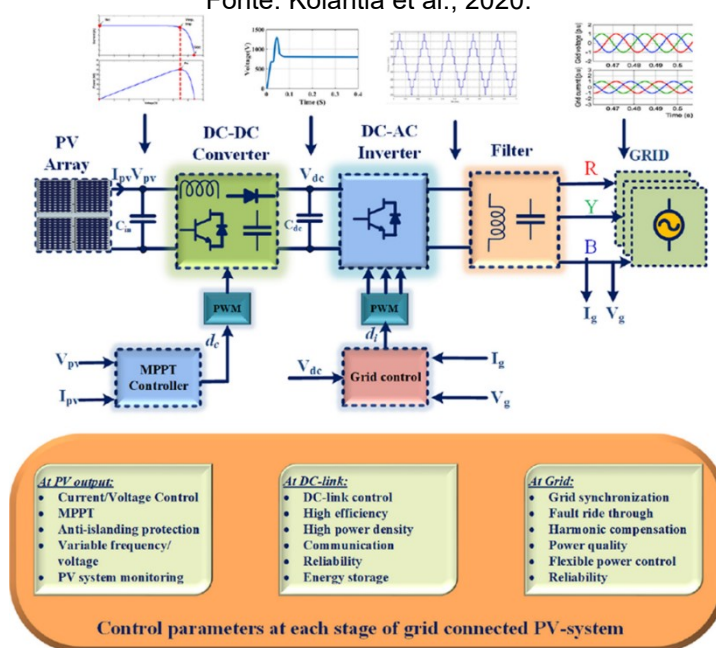
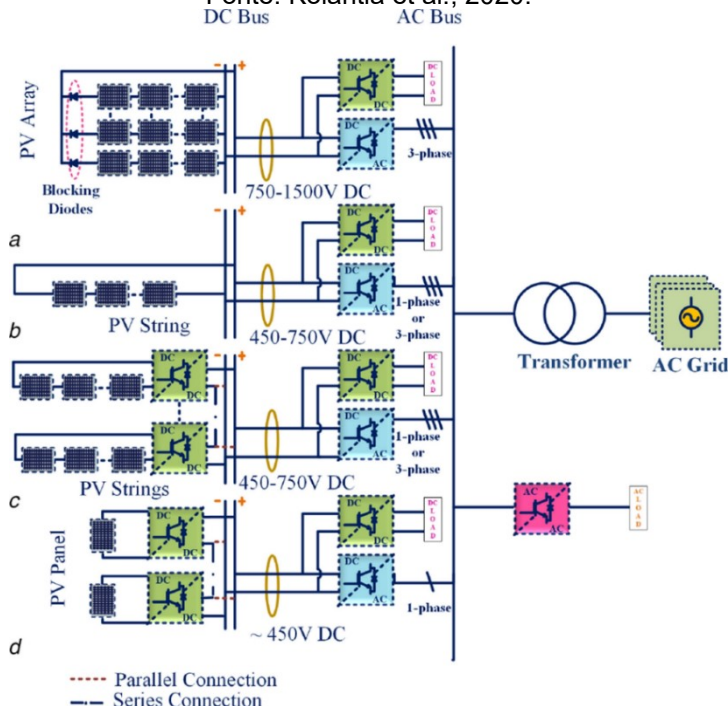


Figura 29: Arquiteturas de um sistema fotovoltaico.

Fonte: Kolantla et al., 2020.



3.1.1. Arquitetura com inversor central

A configuração centralizada conecta grande número de módulos fotovoltaicos a um único inversor para atingir uma tensão suficientemente alta, conforme sugerido na Figura 29. Para evitar corrente reversa sob condição de sombreamento parcial ou bloqueio de qualquer célula *PV*, diodos de bloqueio são conectados em cada *string* do sistema fotovoltaico. Como nesta configuração é utilizado apenas um conjunto de unidade de controle (sensores e unidade de monitoramento), é proveitoso para uma aplicação em grande escala (até 30 kW) do ponto de vista econômico e demanda um inversor central em uma planta fotovoltaica em aplicações de grande porte (5 MW, por exemplo). No entanto, devido ao *MPPT* comum para matrizes fotovoltaicas, há um alto nível de perdas de incompatibilidade (*mismatch*). As curvas dos geradores *PV* apresentam variações entre si devido a fatores construtivos ou funcionais, o que aumenta a complexidade do algoritmo *MPPT* para localizar precisamente o *MPP* global. Outra desvantagem desta configuração é que uma ampliação da planta fotovoltaica é onerosa.

3.1.2. Arquitetura com inversor *string*

A configuração de *string* cada *string PV* está ligada a um inversor individual, não há uso de diodo de bloqueio. Esta topologia apresenta vantagens mistas de um inversor central (estrutura simples) e um micro inversor (alto ganho de energia). A perda de *mismatch* é baixa nesta configuração, pois o *MPPT* é usado no nível da *string*, gerando mais energia. A arquitetura é implementada geralmente para aplicações em um nível de potência médio (1–10 kW) em aplicações residenciais devido à sua estrutura onde cada *string PV* é conectada a um inversor. Como a existência de *MPP* local e global ocorre usando inversores de *string* também em condições de baixa irradiação, técnicas híbridas de *MPPT* são usadas para rastrear *MPP* global.

3.1.3. Arquitetura com inversor multi *string*

Uma combinação de configurações central e *string* produz um inversor *multi-string*. Nesta configuração, as *strings* fotovoltaicas são conectadas em paralelo e cada *string* tem seu conversor c.c.-c.c. específico operando em *MPP* para formar uma matriz fotovoltaica. Esta matriz é então vinculada a um único inversor. O inversor *multi string* tem um conversor c.c.-c.c. conectado a cada *string* pelo qual todos estão operando em *MPPT*, minimizando a perda de *mismatch* entre as *strings*. Essa configuração também mantém as características da configuração centralizada, como arquitetura simples e econômica. A facilidade de instalação, manutenção e comissionamento de inversores *multi string* estão tornando essa configuração mais usada em aplicações residenciais ou comerciais de grande escala (10–30 kW), embora essa configuração exija mais número de inversores. A expansão da configuração *multi string* é fácil, pois a adição de *strings* fotovoltaicas e inversores extras não afeta a arquitetura do sistema já existente.

3.1.4. Arquitetura com micro inversor

Na configuração do módulo c.a., cada módulo fotovoltaico está ligado a um micro inversor. Tal configuração é conhecida como módulo c.a. ou micro inversor. As perdas de *mismatch* entre os módulos fotovoltaicos são minimizadas, devido ao conceito de um módulo fotovoltaico para cada inversor, proporcionando maior rendimento de energia. A dimensionabilidade é alta para um micro inversor, o que o torna altamente flexível. No entanto, isso aumenta o preço por watt. Para aplicações de grande escala, há a necessidade de maior número de inversores. A eficiência geral pode diminuir devido à demanda por amplificação de alta tensão. Como a saída do micro inversor é baixa, um conversor c.c.-c.c. deve ser adicionado para aumentar a tensão para atender aos requisitos da rede. A expansão e instalação tornaram-se uma tarefa fácil com a configuração do módulo. Micro inversores são normalmente usados em aplicações de sistemas pequenos (até 300 W).

Tabela 7: Comparações de diferentes arquiteturas de sistemas fotovoltaicos.

Fonte: Kolantla et al., 2020.

Características	Centralizado	String	Multi-string	Micro inversor
tipo de conexão	Os painéis fotovoltaicos são conectados a um único inversor centralizado	Os painéis fotovoltaicos conectados em <i>strings</i> compreendem um inversor	Muitas <i>strings</i> fotovoltaicas são conectadas em paralelo com cada <i>string</i> tendo seu conversor c.c.-c.c. específico e então conectado a um inversor	cada módulo fotovoltaico tem um inversor integrado nele
faixa de potência	alta escala de pequena escala e de utilidade	média pequena escala e escala de utilidade	pequena escala e escala de utilidade	baixa pequena escala
escalabilidade	nada flexível	flexibilidade até certo ponto	flexibilidade até certo ponto	muito flexível e permite a opção plug-and-play
eficiência	médio	muito alto	médio	Alto
Eficácia MPPT	baixo	médio	médio	Alto
número de componentes	baixo	médio	Alto/fragmento	muito alto
manufaturabilidade	sistema volumoso baixo, a produção em massa é difícil	produção em massa média é possível	produção em massa média é possível	alta modular, a produção em massa é possível
chances de falha	muito baixo	baixo	médio	Alto
vantagens	baixo custo do inversor, manutenção robusta e fácil com maior eficiência	cada corda pode ser orientada em direções de potência máxima	cada string agora pode ser controlada individualmente	cada painel pode ser rastreado de forma otimizada
desvantagens	alta perda de incompatibilidade, sensibilidade do inversor à tensão no lado c.c..	sensibilidade do inversor aumenta	complexidade do sistema e a eficiência geral reduzem	alto custo por potência de pico kW, menor eficiência e dificuldade de manutenção
uso	residencial	sistemas fotovoltaicos residenciais e comerciais	grande usina	aplicações de potência até 200 W
robustez*	++	-	+	-
MPPT*	-	++	+	+++
Confiabilidade*	-	++	+	+++
flexibilidade*	-	++	+	+++
equilíbrio de tensão*	+++	+	++	--
variação de tensão no lado c.c.*	++	+	-	-
cabos c.c.*	++	-	+	--
manutenção*	-	+	++	+++
cabos c.a.*	++	+	+	++
Instalação*	+	++	+	+++
energia c.c.*	++	-	+	--
alimentação c.a.*	-	+	+	++
reposição*	++	-	+	--
incompatibilidade*	++	-	-	--
variação de tensão c.a.*	-	++	+	+++

Onde são apresentadas as seguintes referências: +++ (muito alto), ++ (alto), + (médio), -- (baixo), - (muito baixo).

A Tabela 7 resume e compara as características de cada arquitetura de acordo com as conexões, faixas de potência, capacidade de ampliação, vantagens, desvantagens, número de elementos e custos.

3.2. Inversores e MPPT

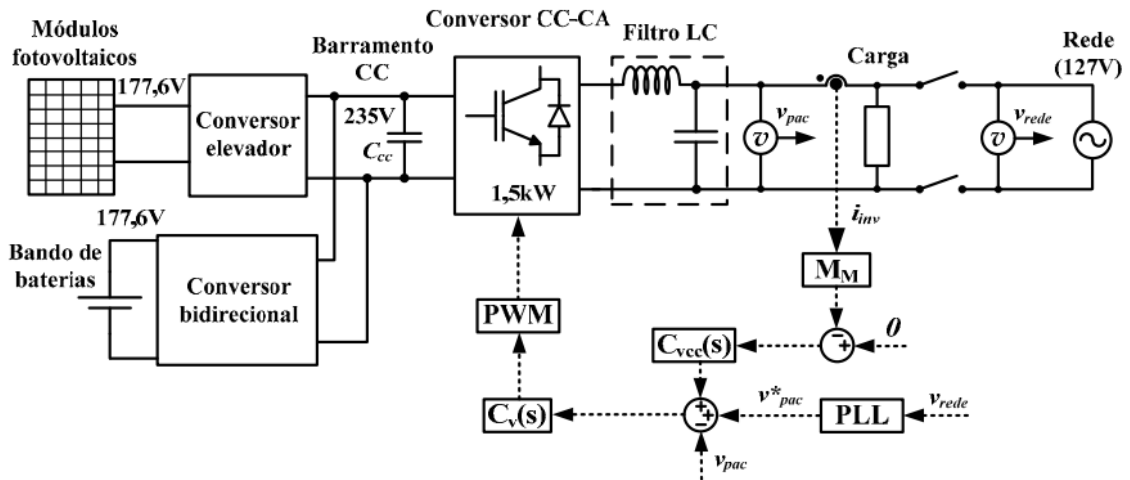
Na configuração simplificada de um SFCR (SFCR - Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede), consideram-se os conjuntos formados pelo gerador fotovoltaico, o inversor e a rede elétrica local. A geração de energia é em c.c. e será condicionada na unidade de potência e transformada em c.a. para ser transmitida à rede elétrica (Zilles et al., 2012).

As classificações dos sistemas de geração fotovoltaicos podem ser resumidas em:

- Sistemas isolados: são os geradores fotovoltaicos não interligados à rede elétrica, fornecem potência e uma tensão senoidal para as cargas. Geralmente, são constituídos por módulos fotovoltaicos, conversores c.c.-c.c. unidirecional; banco de baterias; conversor c.c.-c.c. bidirecional; conversor c.c.-c.a. e malhas de controle de potência, conforme ilustrado na Figura 30;

Figura 30: Sistema de geração fotovoltaico isolado.

Fonte: Brandão, 2013.



- Sistemas conectados: são os que sempre estarão interligados. A referência de tensão pode ser fornecida por uma tabela de senos;
- Sistemas híbridos: podem funcionar tanto interligado como desconectado da rede elétrica, para esta última condição, diz-se que o sistema está ilhado. a referência de tensão deve estar em fase com a tensão da rede para quando o sistema reconectar. O uso do *PLL* (*Phase Lock Loop*) é uma opção para a sincronização.

Os sistemas mais interessantes do ponto de vista do sistema energético são os conectados e híbridos, uma vez que podem mitigar a demanda, sobretudo nos horários de ponta (Brandão, 2013). Visando a disponibilização de energia elétrica em regiões remotas e a inclusão social, por exemplo, os sistemas isolados são

apontados como uma interessante solução. No Brasil a solução apresenta vantagens, dadas as dimensões continentais.

Há a expectativa que a rede elétrica do setor residencial brasileiro convirja a seguir as tendências norte americanas e europeias, dos sistemas interligados à rede elétrica. Possuindo baterias, isto é, com sistema de armazenamento, é possível operar o sistema como um sistema híbrido. Tais sistemas apresentam características mais dispendiosa, ou seja, o investimento será maior, contudo, algumas flexibilidades podem ser agregadas (Brandão, 2013).

A multifuncionalidade pode ser definida como a possibilidade do conversor c.c.-c.a. (corrente contínua – corrente alternada) do gerador fotovoltaico operar como quatro diferentes estruturas, sendo elas:

- Fonte de tensão controlada;
- Fonte de corrente controlada;
- *Static Synchronous Compensator (STATCOM)*;
- Compensador ativo.

O inversor é um dos principais componentes e é essencial para um sistema fotovoltaico integrado ou não à rede. Os inversores são classificados com base em sua topologia de configuração, tamanho, potência e ou modo de operação. As tarefas vitais do inversor incluem conversão de baixa perda, otimização de energia, monitoramento e segurança, gerenciamento de temperatura e proteção. Para a aplicação da integração à rede, estão disponíveis praticamente dois tipos de inversores fotovoltaicos, ou seja, com transformador e sem transformador (Kolantla et al., 2020). Assim, para integrar a rede e o sistema fotovoltaico, o sistema fotovoltaico pode ser projetado de acordo com as propriedades necessárias da seguinte forma:

- Estágio único ou estágio múltiplo;
- Uso de capacitores de desacoplamento;
- Se o isolamento está presente ou não;
- Se um inversor é usado para sistemas monofásicos ou trifásicos;
- Com/sem uso de conversor c.c.-c.c..

Os inversores, de maneira geral e de acordo com a proposta do trabalho, são resumidos na Tabela 8, de acordo com tecnologia, geração, se convencionais ou *smart* e ainda segundo as principais premissas relacionadas a injeção de potência ativa e reativa na rede principal, compensação de harmônicos e fator de potência. A opção do inversor selecionado para as simulações abordará os *smart inverters*.

A capacidade de hospedagem (*hosting capacity*) de geração distribuída (GD) em uma rede de distribuição pode ser definida como a capacidade máxima de GD que pode ser acomodada ou hospedada na rede, sem impactar a operação, em termos de limites de carregamento dos alimentadores, perfil de tensões, perdas ativas, confiabilidade e proteção, por exemplo. Ao alcançar, ainda exceder o limite de GD impactos adversos podem acontecer, exigindo análise adicional para autorizar sua instalação.

Tabela 8: Análise comparativa entre as gerações dos inversores.

Fonte: Srinivasarangan Rangarajan et al., 2020; Ton et al., 2012; Boroyevich et al., 2010.

Geração:		Principais características:
Inversor Convencional	Primeira	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gera potência ativa com fator de potência constante e tipicamente unitário.
Inversor Inteligente (<i>Smart Inverter</i>)	Segunda	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Evolução dos inversores de primeira geração, motivado pela melhoria da qualidade de energia; ▪ Geram e modulam a potência ativa; ▪ Trocam potência reativa (indutiva ou capacitiva) com a rede principal; ▪ Compensam harmônicos (propostas futuras); ▪ Possuem resposta autônoma, ou seja, aumentam ou diminuem a potência ativa e reativa, como função da leitura local (tensão ou frequência) no ponto de conexão com a rede.
	Terceira	<ul style="list-style-type: none"> ▪ São aqueles em que todas as funcionalidades do inversor de segunda geração são consideradas com o adicional que estes inversores podem ser controlados remotamente, ou seja, os inversores recebem o sinal de um agente externo e eles modulam a potência ativa e reativa. Para a implementação da microrrede despachável há maior interesse nos inversores de terceira geração; ▪ A motivação da evolução é aumentar o <i>hosting capacity</i> (capacidade de hospedagem dos sistemas de distribuição) do sistema de potência, melhorando a qualidade de energia e explorando ao máximo a capacidade de eletrônica de potência dos inversores.

Um dos fatores importantes para maximizar a utilização e eficiência de qualquer sistema fotovoltaico (PV) é a técnica de rastreamento de ponto de máxima potência (*MPPT - Maximum Power Point Tracking*). O *MPPT* é usado especificamente para extrair a potência máxima disponível do painel fotovoltaico, a potência máxima pode ser alcançada rastreando o Ponto de Potência Máximo (*Maximum Power point - MPP*) (Ahmed et al., 2016) utilizando métodos tais como o de tensão constante, o de varredura de corrente, o da condutância incremental ou o chamado perturba e observa (*Perturb and Observe - P&O*). No modo isolado, este conversor é também aplicável, desde que opere em paralelo com pelo menos um conversor formador de rede, um conversor de suporte de rede ou um gerador síncrono local (Júnior, 2022).

3.3. Geração distribuída

A Geração Distribuída (GD) é o termo referente à geração de energia elétrica localizada próxima ou mesmo nas unidades consumidoras (Medeiros et al., 2018). Pode ser obtida a partir de diferentes fontes e tecnologias e são conectadas em pontos distintos da rede elétrica. No Brasil, a GD inclui as pequenas centrais hidrelétricas (de 3 MW a 30 MW), outras renováveis (eólica, solar, etc.), conectadas diretamente às redes de distribuição, e exclui geração de energia utilizando combustíveis fósseis (gás natural, óleo diesel, etc.) com exceção aos resíduos ou a biomassa.

A ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), para incentivar a GD de pequeno e médio porte (micro e minigeração), editou a resolução normativa 482/2012, modificada pela resolução normativa 687/2015, orientando a regulação de GD no país. A regulação estabelece, principalmente (Aneel, 2016):

- **Microgeração Distribuída:** definida como central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW, usando cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.
- **Minigeração Distribuída:** definida como a central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 5 MW para cogeração qualificada.

A micro e minigeração distribuída no Brasil é operada de acordo com um Sistema de Compensação de Energia, ou *Net Metering*, pelo qual não existe venda da energia produzida na unidade distribuída, mas uma compensação (do consumo) (Medeiros et al., 2018). Segundo os dados divulgados, há indicações de uma elevada taxa de crescimento da mini e microgeração distribuída no país, tanto em termos de unidades quanto de potência instaladas. Além disso, são substanciais as previsões de crescimento desse tipo de geração de energia elétrica para o horizonte de 2024 (Aneel, 2017).

Sob a perspectiva elétricas, as GDs apresentam vantagens para o sistema elétrico, tais como, postergação de investimentos pela redução da demanda líquida, redução de perdas e maior confiabilidade, por exemplo. Entretanto, as GDs introduzem desafios técnicos em termos de controle de tensão e carregamento de alimentadores reajuste da proteção. Assim, avaliações dos impactos das GDs na rede de distribuição é de primordial importância em estudos de expansão e operação. Atualmente há pesquisas nesse contexto da capacidade máxima de hospedagem (*hosting capacity*) das GDs, a respeito da máxima capacidade instalável nas GDs sem causar problemas operacionais (Medeiros et al., 2018).

Já sob a ótica ambiental, a GD pode beneficiar o meio ambiente, pois o uso pode reduzir a demanda energética a ser gerada em usinas centralizadas, por sua vez pode reduzir os impactos ambientais da geração centralizada. A destacar (EPA, 2022):

- As tecnologias de geração distribuída de baixo custo existentes podem ser usadas para gerar eletricidade em residências e empresas (com recursos de energia renovável, como solar e eólica);
- A geração distribuída pode minimizar os efeitos de perdas de energia – por exemplo, por meio de um sistema combinado de calor e energia;
- Ao utilizar fontes de energia locais, a geração distribuída reduz as perdas, por exemplo de transmissão e distribuição no sistema de distribuição de energia elétrica.

No entanto, a geração distribuída também pode apresentar impactos ambientais indesejados, na instalação, ou no final de sua vida útil quando são substituídas ou removidas (EPA, 2022):

- Os sistemas de geração distribuída demandam recursos naturais e insumos (eles ocupam espaço) e, por estarem localizados mais

próximos do usuário final, alguns sistemas de geração distribuída podem ser desagradáveis à vista ou causar problemas de uso da terra;

- As tecnologias de geração distribuída que envolvem combustão – principalmente a queima de combustíveis fósseis – podem produzir muitos dos mesmos tipos de impactos que usinas elétricas maiores movidas a combustível fóssil, como a poluição do ar. Esses impactos podem ser menores em escala do que os impactos de uma grande usina, mas também podem estar mais próximos de áreas povoadas.
- Algumas tecnologias de geração distribuída, como incineração de resíduos, combustão de biomassa e calor e energia combinados, podem exigir água para geração de vapor ou resfriamento.
- Sistemas de geração distribuída que usam combustão podem ser menos eficientes do que usinas centralizadas devido a eficiências de escala.

3.4. Microrredes despacháveis

O *NIST* - Instituto Americano de Tecnologia e Padrões (*National Institute of Standards and Technology*), define rede inteligente (*SG - Smart grid*) como a rede planejada dotada de tecnologia da informação para fornecer eletricidade de forma eficiente, confiável e segura. Definições mais abrangente do *NIST* descrevem a *SG* como a rede modernizada que permite fluxos bidirecionais de energia e usa comunicação bidirecional e recursos de controle que conduzirão a uma série de novas funcionalidades e aplicações, ao contrário da rede atual, onde há o fornecimento, de eletricidade em um fluxo unidirecional do gerador para a tomada. A rede inteligente permitirá o fluxo bidirecional de eletricidade e informação (*NIST*, 2012).

No conceito de *SG*, diferente da organização centralizada tradicional do setor energético ilustrado na Figura 31, o Centro de Controle de Energia (*ECC - Energy Control Center*) apresentado na Figura 32 mostra um medidor de energia inteligente e disjuntor operado remotamente (desconexão). O *ECC* é capaz de se comunicar com a concessionária de energia elétrica para fins de comercialização de energia, e uma de suas funções é atuar como unidade de aquisição de dados coletando e registrando os dados de fluxo de energia não apenas de/para a rede, mas também de todos os conversores e eletrodomésticos inteligentes presentes nas residências. As principais características que distinguem a arquitetura do sistema elétrico da Figura 32 em comparação com as casas tradicionais (atuais), incluem o *ECC*, a geração de energia renovável, o *PHEV* e/ou armazenamento de bateria local, bem como a capacidade de programar e se comunicar com a maioria dos componentes do sistema, isto é, a capacidade de inteligência distribuída, simbolizada pela presença de muitos microcomputadores embutidos (μC) (*Boroyevich et al.*, 2010).

As microrredes (*MR*) são entidades elétricas inseridas no contexto de redes inteligentes, sendo caracterizadas como sistemas de energia (de pequena ou grande escala) com capacidade de autogeração. A *MR* genérica integra grupos de cargas e recursos de energia distribuída (*RED*), que incluem fontes de energia renováveis e sistemas de armazenamento de energia (*SAE*) (*Júnior*, 2022). Na *MR* os conversores eletrônicos de potência (*CEP*) são responsáveis pela interface das

fontes primárias de energia distribuídas com a rede principal. Usualmente, a fonte primária de microgeração é baseada em energias renováveis de pequena escala e a sua instalação ocorre em redes de média e baixa tensão randomicamente e em numerosas quantidades, como ocorre por exemplo com os sistemas fotovoltaicos instalados em telhados.

Figura 31: Organização centralizada tradicional do setor energético.

Fonte: Júnior, 2022.

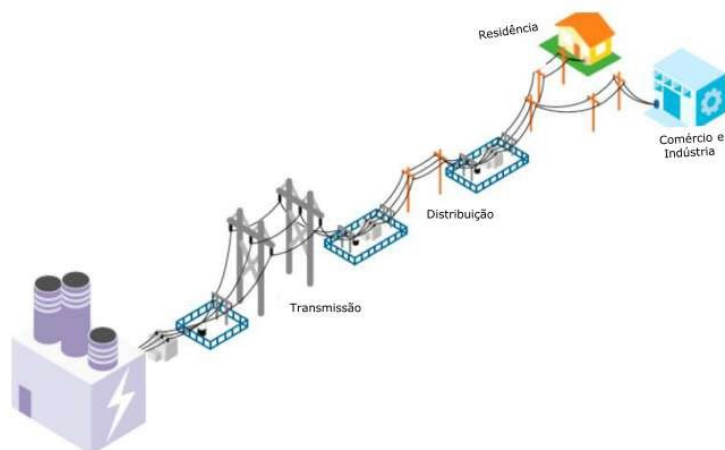
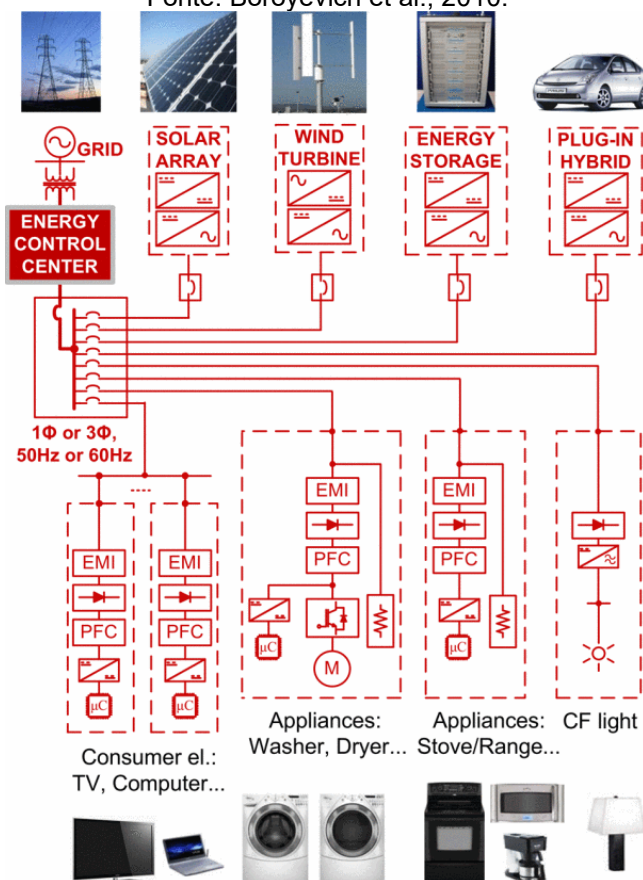


Figura 32: Ilustração de uma rede inteligente *nanogrid* tradicional residencial.

Fonte: Boroyevich et al., 2010.



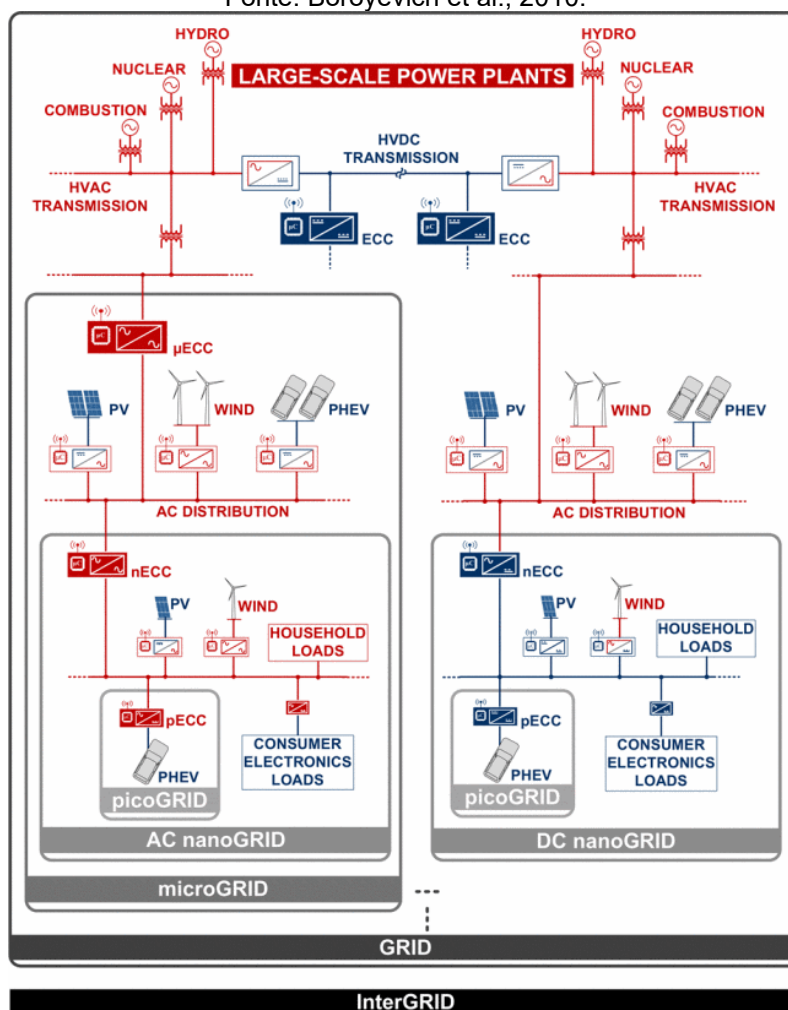
Neste modelo da MR, a despachável, as premissas são as conexões de pequenas MR (pico/nano/microrredes) nas redes de maior porte, ou seja, a pico-grid se conecta ao nano-grid. Esta por sua vez, será conectada à microrrede por sua vez se conectará a rede principal e assim sucessivamente, conforme lustrado na Figura 33 (Srinivasarangan Rangarajan et al., 2020; Ton et al., 2012; Boroyevich et al., 2010).

De maneira geral, a definição de MR despachável é compreendida como um grupo de cargas e fontes com capacidade de geração e armazenagem. Este grupo precisa atender três requisitos (Srinivasarangan Rangarajan et al., 2020; Ton et al., 2012; Boroyevich et al., 2010), descrito nos subitens abaixo:

- Distribuição eficiente dos recursos energéticos entre os elementos da rede, ou seja, as respectivas contribuições das fontes para uma determinada demanda (eficiente compartilhamento de potência - *power sharing autonomous capability*), conforme a Figura 35;

Figura 33: SEP conceitual híbrido hierarquicamente interconectado de sub-redes.

Fonte: Boroyevich et al., 2010.



- Atuar como *single-controllable entity*, ou seja, todo o grupo precisa ser enxergado pela rede a montante (visto pela concessionária de energia) como um único agente, conforme a Figura 34. Isso se caracteriza em termos de controle de MR como o controle de potência ativa e reativa

no ponto de conexão (PAC - Ponto de acoplamento comum) da MR com a concessionária de energia (com a rede a montante). A concessionária, então, passa a enxergar todos os elementos como um único ente, isto é, uma MR e para isso os módulos de comunicação passam a ser essenciais, além dos armazenadores de energia;

- Capacidade em operar em ambos os modos de controle, ilhado (desconectado) ou conectado, ver Figura 35. Mesmo no modo ilhado, parte das cargas continuarão alimentadas e são necessários os elementos: provedores de armazenamento de energia, inércia e garantidores de transição suave entre os modos de operação, pois as tensões e as correntes não podem sofrer muitas perturbações (qualidade de energia), pois podem desconectar todos os elementos PV, por exemplo.

Os SA (SA – serviços ancilares) são serviços operacionais reservados contratados pelo Operador do Sistema de Transmissão (OST) para manter o equilíbrio entre oferta e demanda, estabilizar o sistema de transmissão e manter a qualidade da energia de forma econômica em qualquer ambiente competitivo do mercado de eletricidade. Em uma rede interconectada, são necessários SA para amparar a transmissão de energia, manter uma operação confiável e garantir o nível exigido de qualidade e segurança de energia. Por meio dos SA é possível manter as demandas de geração e carga em equilíbrio com a segurança do sistema. São exemplos de controles adotados nos SA para contribuir para um mercado de energia competitivo: controle de frequência, controle de tensão, reserva de giro, reserva permanente, *black start capability*, controle de geração automática remoto, compensação de perda de rede e ações de controle de emergência (Pirbazari, 2010).

Figura 34: Compartilhamento de potência e *single-controllable entity*

Fonte: Srinivasarangan Rangarajan et al., 2020; Ton et al., 2012; Boroyevich et al., 2010.

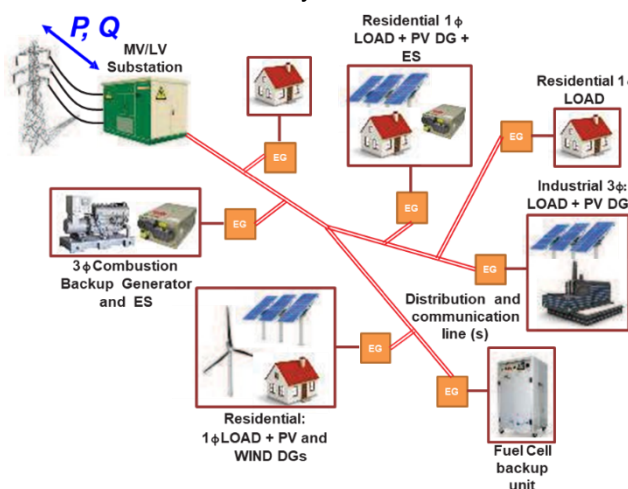
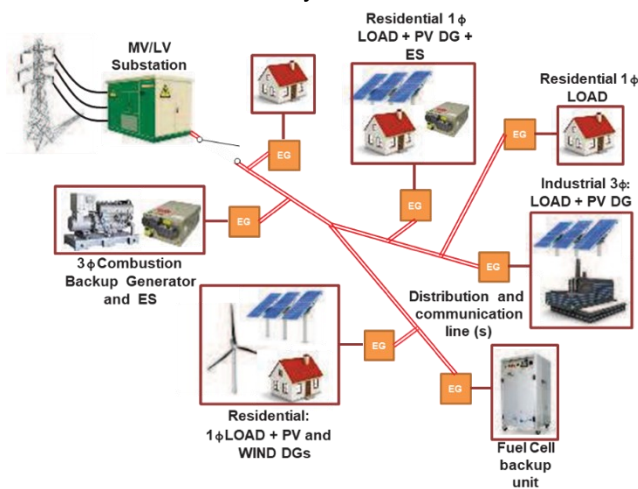


Figura 35: Operação em ambos os modos de controle - ilhado ou conectado.

Fonte: Srinivasarangan Rangarajan et al., 2020; Ton et al., 2012; Boroyevich et al., 2010.



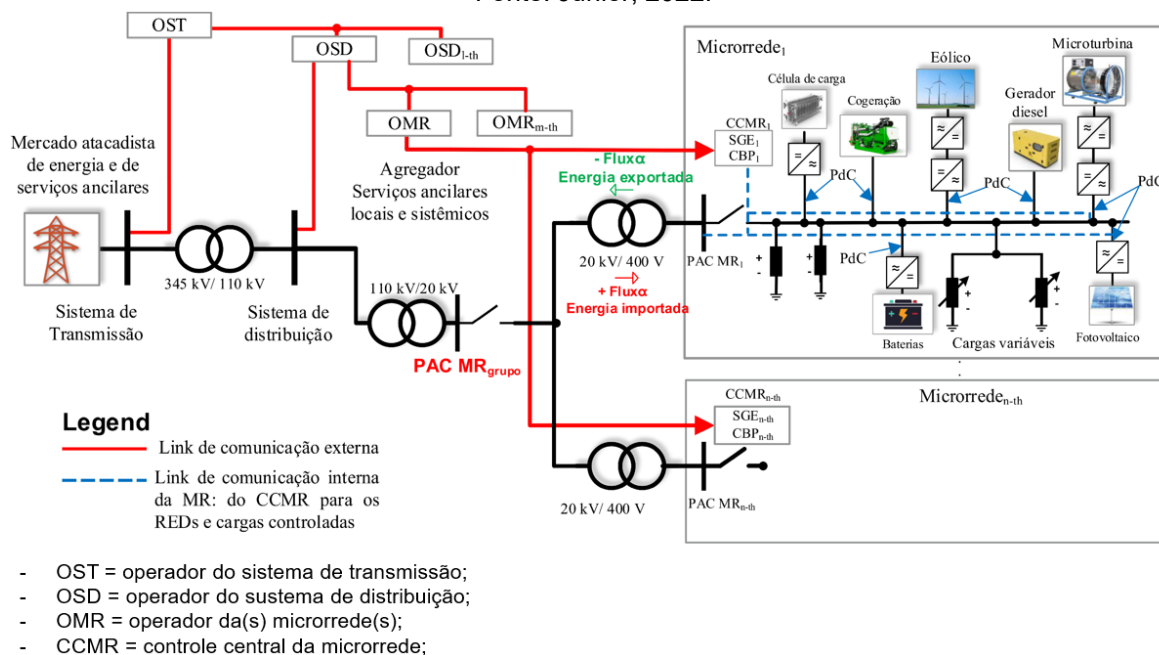
A operação do sistema elétrico requer conjuntos de SA. Os SA são comumente aplicados nos segmentos de geração e transmissão, mas as redes de distribuição, ao se tornarem ativas com a integração dos RED, podem incorporar um

controle flexível e inteligente, para otimizar os diversos recursos. As MR despacháveis podem suportar recursos de resposta à demanda local, permitindo que SA sejam negociados em mercados de energia com outros participantes, por exemplo, operadores de rede ou ainda MR vizinhas (Júnior, 2022).

O sistema transacional de energia (STE) pode ser definido como os mecanismos econômicos e de controle responsáveis pelo equilíbrio dinâmico de oferta e demanda em toda a infraestrutura da rede elétrica, usando valores como parâmetros operacionais chaves (Júnior, 2022). A comunicação é a base para a integração das operações do STE no sistema de transmissão e distribuição, para permitir participantes, RED e MR, por exemplo, concordem com o fornecimento de serviços e gerenciem sua operação e alcançar o equilíbrio desejável do balanço de potência sem comprometer a operação confiável do sistema de energia. Além disso, a participação de muitos agentes permite a mútua comunicação e a interoperabilidade é alcançada em todos os níveis da rede elétrica, promovendo a integração de RED e a oferta de SA, além de aumentar a capacidade de hospedagem de fontes e a rentabilidade. Nesse contexto as MR podem operar como usinas virtuais de energia, dentro do STE, ilustrado na Figura 36 (Júnior, 2022).

Figura 36: Hierarquia de controle do sistema elétrico de potência com MR.

Fonte: Júnior, 2022.



O STE da Figura 36 apresenta as interconexões dos sistemas de distribuição com as MR, onde com as n -ésimas MR despacháveis de baixa tensão (BT), compreendidas por RED compostos por sistemas fotovoltaicos, eólicos, microturbinas, célula combustível, baterias, por exemplo, conectadas no ponto de conexão (PdC), além de cargas controláveis e não controláveis. Os elementos da MR são hierarquicamente e coordenadamente controlados pelo controle central da microrrede (CCMR), análogo ao ECC apresentado na Figura 32, para operar quando conectado à rede e durante o modo ilhado, e em interoperabilidade com o operador da microrrede (OMR), considerado inserido no CCMR. Os sistemas de distribuição são guiados por l -ésimos operadores dos sistemas de distribuição (OSD) e são

interligados a um sistema de transmissão e é acionado pelo operador do sistema de transmissão (OST) (Júnior, 2022).

No cenário do mercado brasileiro, o prossumidor é cada vez mais comum nos dias de hoje e trata-se do consumidor de energia que produz para o seu próprio consumo. Os prossumidores estão se inserindo nos sistemas elétricos atuais originalmente dimensionados considerando apenas cargas passivas, sem os recursos distribuídos. Assim, as distribuidoras e órgãos regulatórios serão os entes responsáveis por levantarem questões técnicas para lidar com esse movimento real e atual. Universidades, comércios e condomínios são exemplos de prossumidores poderão ser caracterizados como MR e isso significa que deverão estar habilitados para selecionar o seu modo de operação em tempo real conforme a sua conveniência, controlar a alimentação ou consumo de potência ativa e reativa na rede e ainda estabelecer ou não a operação ilhada ou conectada com a rede. Isso implica na possibilidade de ofertar SAs aproveitando de soluções e alternativas disponíveis no mercado (Júnior, 2022).

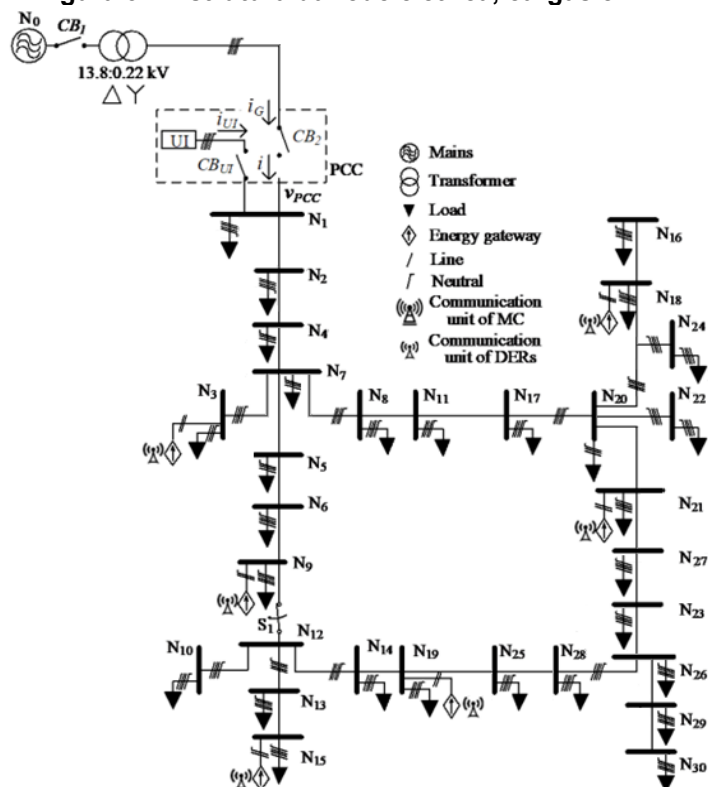
4. MODELAGEM E RESULTADOS DOS IMPACTOS DAS INSTALAÇÕES DE BEV EM MICRORREDES DESPACHÁVEIS

4.1. Modelagem

4.1.1. Estrutura do sistema elétrico

O sistema elétrico de potência (SEP - sistema elétrico de potência) simulado é apresentada na Figura 37. A rede elétrica de baixa tensão é alimentada por um transformador abaixador de 13,8-0,22 kV e 225 kVA. São 30 nós, cada um representando um consumidor residencial.

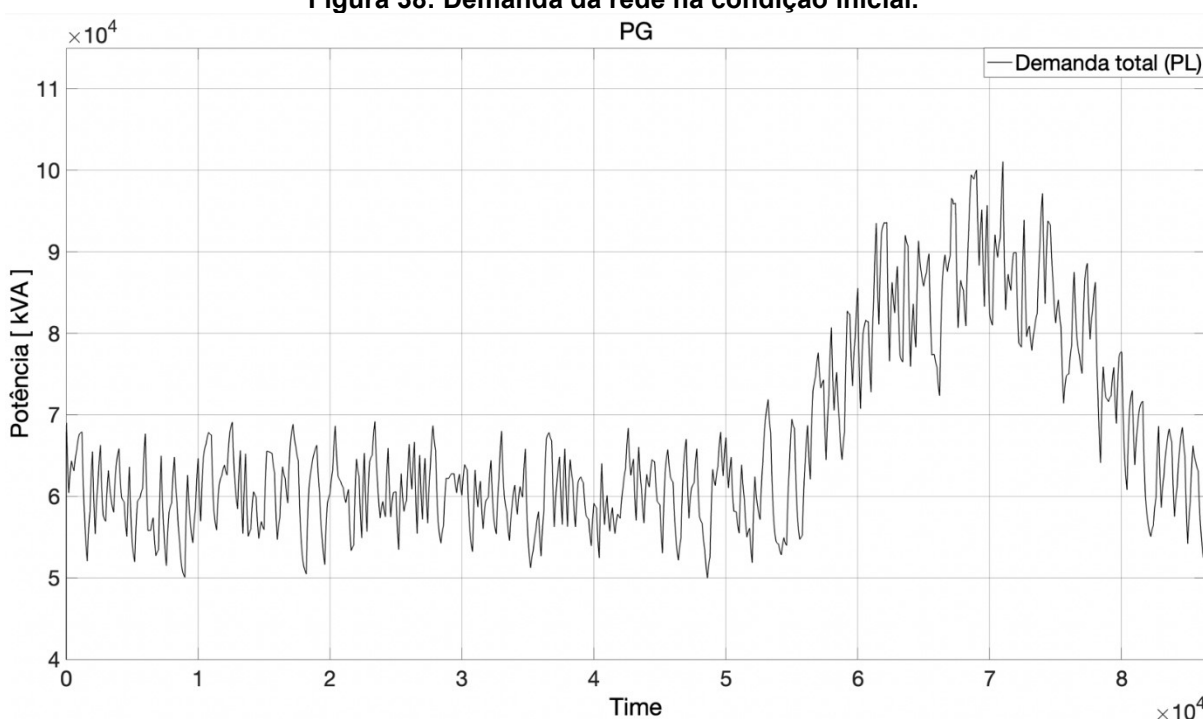
Figura 37: Estrutura da rede elétrica, cargas e BEV.



O SEP é composto por seis geradores fotovoltaicos de terceira geração de 20 kVA (*power rating*) / 16 kW (*power capacity*). O SEP será simulado no Simulink / MathWorks, com base no modelo de geração distribuída, no domínio fasorial (Júnior, 2022), considerando um sistema trifásico desbalanceado, no contexto de um SEP operando durante vinte e quatro horas, e os resultados serão avaliados em três etapas, após a adição de cada um dos três grupos com dez cargas (*BEV*) cada, com o objetivo de avaliar o impacto da instalação dos *BEV*, até totalizar os trinta no SEP, em relação às condições iniciais de operação do sistema elétrico.

A denominada condição inicial da rede elétrica é aquela onde há a operação sem a instalação dos *BEV*. Neste sentido, com o intuito de realizar a caracterização inicial do SEP e apresentar os impactos da instalação após a conexão dos veículos elétricos, o perfil de demanda da rede é apresentado na Figura 38.

Figura 38: Demanda da rede na condição inicial.



A demanda são aproximadamente 60 kVA (médio), durante o dia, e o pico da demanda de ponta (18 h às 21 h), são 101,1 kVA observado às 19 h (horas) e 43 min (minutos) – o tempo nas abcissas apresentado em todos os Gráficos doravante “Time” denotado em segundos. Os perfis de tensão e corrente no *PCC (Point of Common Coupling)* são apresentados nos gráficos das Figuras 39 e 40 e é observado o desequilíbrio entre as fases devido ao desbalanceamento das cargas.

O valor mínimo da tensão é de 176,4 V ($V = 124,7 V_{rms}$ - eficaz) e a corrente máxima de 370,1 A ($I = 261,7 A_{rms}$ - eficaz) às 19 h (horas) e 43 min (minutos), no tempo $t = 71006$ segundos.

O desequilíbrio de tensão é determinado (EPE, 2002; IEEE, 1987), conforme a equação (2) e é apresentado no gráfico da Figura 41.

$$VUF = \frac{3 \cdot (V_{m\acute{a}x} - V_{m\acute{i}n})}{V_A + V_B + V_C} \times 100\% \quad (2)$$

Os *BEV* são cargas monofásicas e impactarão ainda mais o desequilíbrio de tensão. Portanto, é esperado o percentual de desequilíbrio ao longo do dia com os veículos em recarga. E quanto mais *BEV* conectados maior será a tendência do desequilíbrio.

Figura 39: Perfil de tensão da rede na condição inicial.

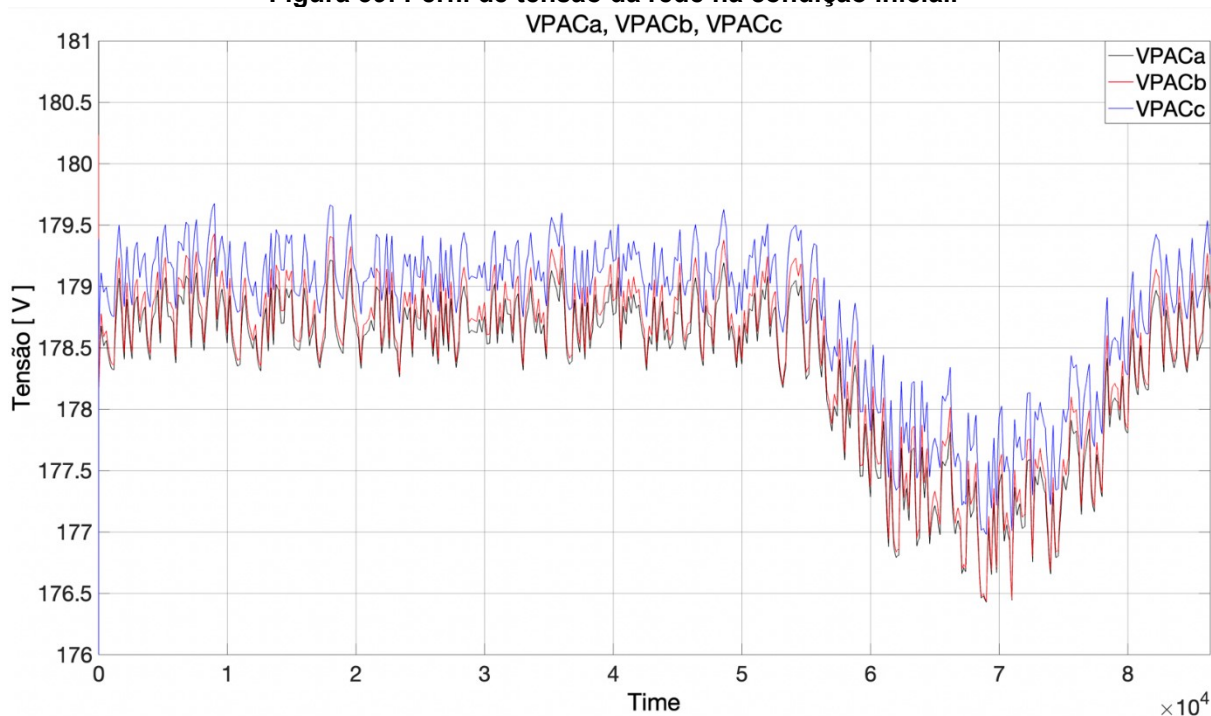
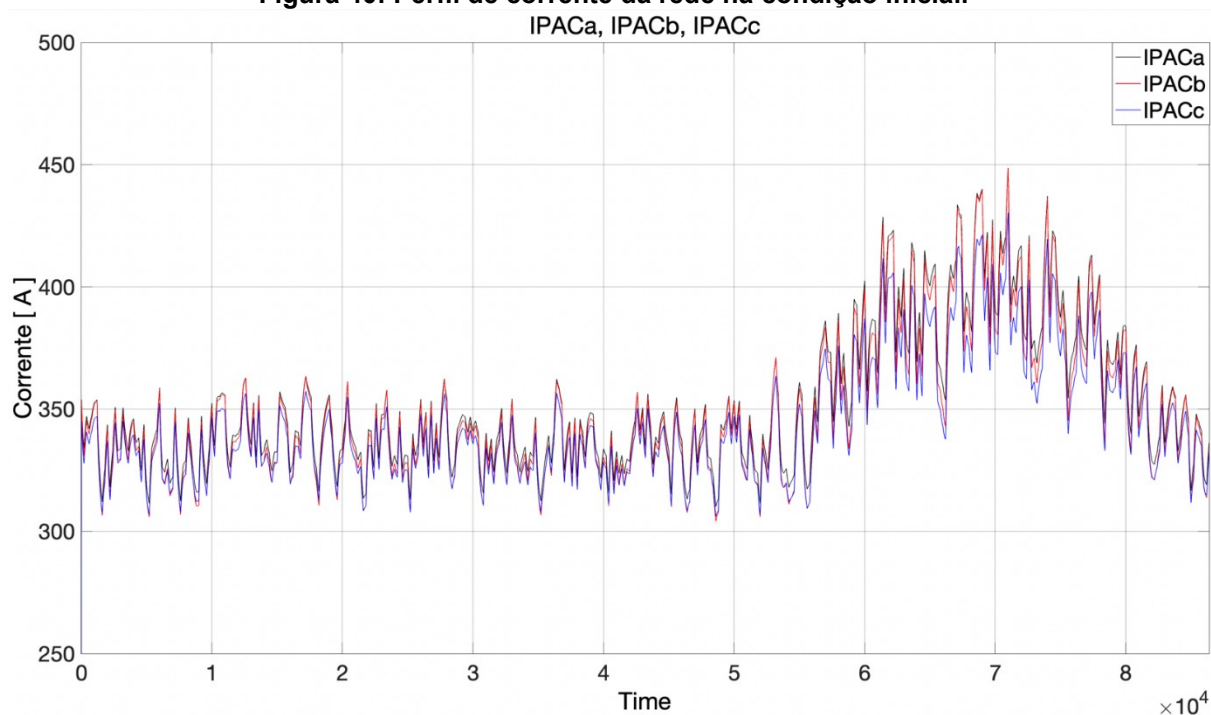
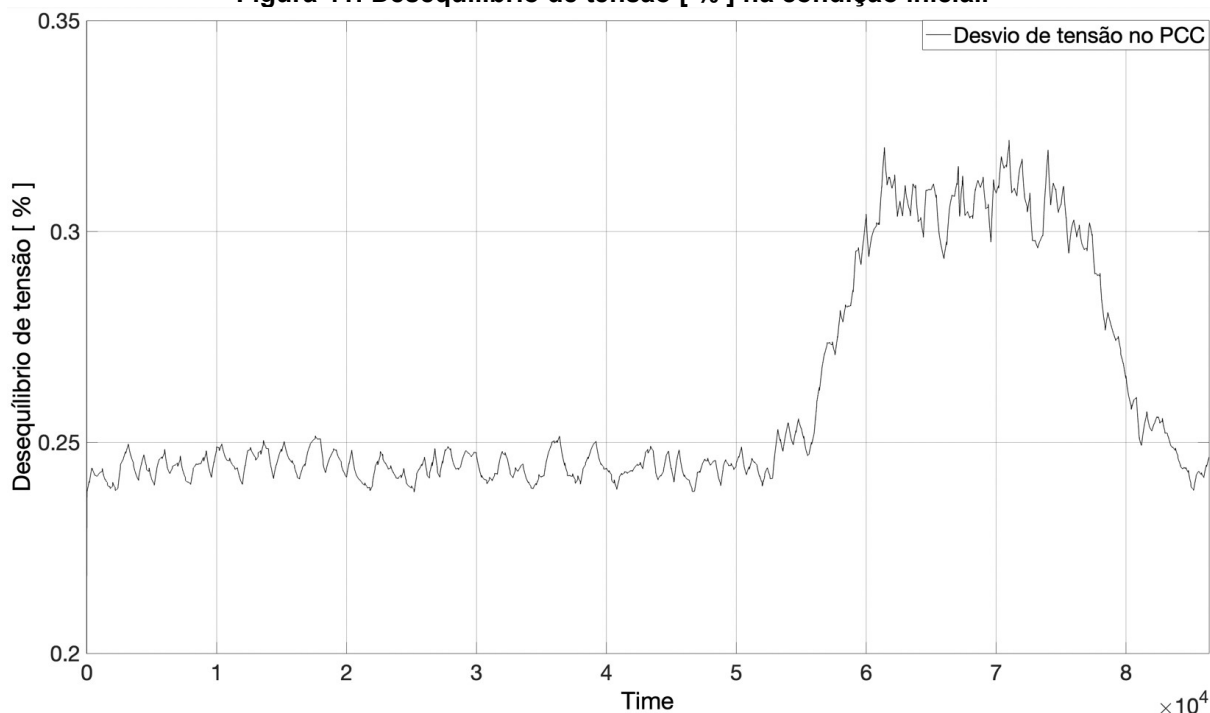


Figura 40: Perfil de corrente da rede na condição inicial.



O desequilíbrio percentual máximo é de 0,32% às 19h e 43 min, no período de demanda de ponto, de acordo com o gráfico apresentado na Figura 41. Este valor é inferior ao limite de operação normal de 2,5%, ou de 1,5% até 2%, (EPE, 2002; IEEE, 1987), conforme as referências da EPE (empresa de pesquisa energética) / ONS (Operador Nacional do Sistema) e *IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)*, respectivamente. Para valores superiores, medidas de mitigação devem ser adotadas. Neste sentido, o SEP em questão será avaliado para determinar os desequilíbrios de tensão, corrente e potência após as adições dos *BEV*.

Figura 41: Desequilíbrio de tensão [%] na condição inicial.



4.1.2. Veículos elétricos e *hosting capacity*

As características de conexão de cada *BEV* na rede elétrica, potência demandada para a carga das baterias e a posição de instalação nos nós do SEP são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9: Características dos *BEV* no SEP.

<i>BEV</i> :	Nó de instalação da carga no SEP:	Conexão	Potência [W]	Loop
EV1	3	BC	6000	1
EV2	9	AB	4000	
EV3	15	AC	6000	
EV4	19	CB	7000	
EV5	21	BA	5000	
EV6	18	CA	7000	
EV7	1	BC	2000	
EV8	30	AB	11000	
EV9	26	AC	4000	
EV10	11	CB	2000	
EV11	2	BA	6000	1-2
EV12	5	CA	4000	
EV13	10	BC	6000	
EV14	17	AB	7000	
EV15	25	AC	5000	
EV16	13	CB	7000	
EV17	23	BA	2000	
EV18	22	CA	11000	
EV19	16	BC	4000	
EV20	14	AB	2000	
EV21	4	AC	6000	1-2-3
EV22	7	CB	4000	
EV23	6	BA	6000	
EV24	12	CA	7000	
EV25	8	BC	5000	
EV26	20	AB	7000	
EV27	24	AC	2000	
EV28	27	CB	11000	
EV29	28	BA	4000	
EV30	29	CA	2000	

Os *BEV* são monofásicos e conectados entre as fases ($V_{\text{fase-fase}} = 220 \text{ V}$). Ampliando o conceito de *hosting capacity*, relacionando a geração distribuída, com os veículos elétricos e a capacidade de integração do veículo elétrico na *smart grid*, conforme demonstrado na Figura 21, para otimizar os índices de qualidade de energia, os veículos foram conectados na rede e as baterias de alguns *BEV* suportarão o SEP na demanda de ponto com o objetivo de mitigar o desequilíbrio e a queda de tensão da rede, conforme apresentado nas Tabelas e Gráficos a seguir.

A Tabela 10 reapresenta as potências dos *BEV* e os valores negativos é referente a energia injetada na rede. A projeção gráfica é apresentada na Figura 42.

As principais características das baterias dos veículos elétricos são apresentadas na Tabela 6 (396 V, 240 Ah, 95 kWh, 150 kW). O estado de carga das baterias (*SoC – State of Charge*) dos *BEV* é determinado pela contagem de Coulomb (Brandão, 2013) e expresso por:

$$SOC = 1 - \left(\frac{\int_0^t i_{bat}(t) dt - C}{Q} \right) \times 100\% \quad (3)$$

Tabela 10: Potência dos *BEV* conectados no SEP.

BEV	EV1	EV2	EV3	EV4	EV5	EV6	EV7	EV8	EV9	EV10
	EV11	EV12	EV13	EV14	EV15	EV16	EV17	EV18	EV19	EV20
	EV21	EV22	EV23	EV24	EV15	EV26	EV27	EV28	EV29	EV30
Tempo [hh]	P [W]	P [W]	P [W]	P [W]	P [W]	P [W]	P [W]	P [W]	P [W]	P [W]
0	6000	4000	6000	-7000	-5000	7000	0	-11000	0	2000
1	6000	4000	6000	-7000	-5000	7000	0	-11000	0	2000
2	6000	4000	6000	-7000	-5000	7000	0	-11000	4000	2000
3	6000	4000	6000	-7000	-5000	7000	0	-11000	4000	2000
4	6000	4000	6000	7000	0	0	0	0	0	2000
5	6000	4000	0	7000	0	0	0	0	0	0
6	6000	4000	0	7000	0	7000	0	0	0	0
7	6000	4000	0	0	0	7000	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	7000	2000	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	2000	0	0	0
10	0	0	0	7000	5000	0	2000	11000	0	0
11	0	4000	0	7000	5000	0	2000	11000	0	0
12	0	4000	0	7000	5000	0	2000	11000	0	2000
13	0	4000	0	0	0	0	2000	11000	0	2000
14	0	0	0	0	0	0	2000	11000	0	2000
15	0	0	0	0	0	0	2000	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	2000	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	2000	0	0	0
18	-6000	0	-6000	-7000	0	0	0	-11000	-4000	0
19	-6000	0	-6000	-7000	0	0	0	-11000	-4000	-2000
20	-6000	0	-6000	7000	0	-7000	0	-11000	4000	-2000
21	-6000	0	-6000	7000	0	-7000	0	11000	4000	-2000
22	-6000	0	6000	7000	5000	0	0	11000	4000	0
23	6000	4000	6000	7000	5000	7000	0	11000	4000	0

As Figuras 42-44 apresentam as curvas de cargas e descarga (balanço energético) das baterias dos *BEV* nos loops (1-3), conforme já explicitado na Tabela 10, com o objetivo de ampliar o *hosting capacity* e melhorar a qualidade de energia. Cada um dos ciclos visa caracterizar e explicitar os impactos na qualidade de energia, no que diz respeito a distorção do nível de tensão no PCC e a queda de tensão nos nós distribuídos no SEP onde serão realizadas as medições de tensões de controle (tensão de atendimento) apresentados na Figura 46.

Figura 42: Potência unitária dos BEV conectados no SEP – loop 1.

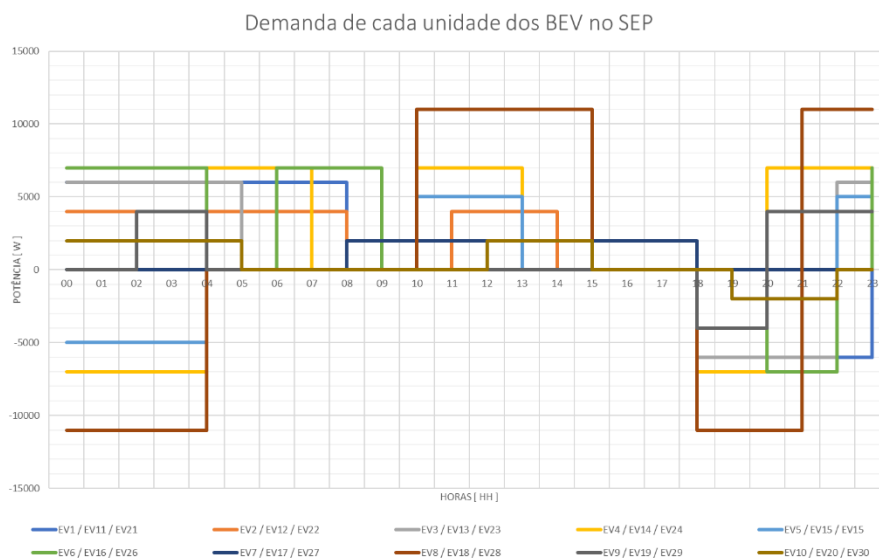


Figura 43: Balanço energético dos BEV no SEP – loop 1.

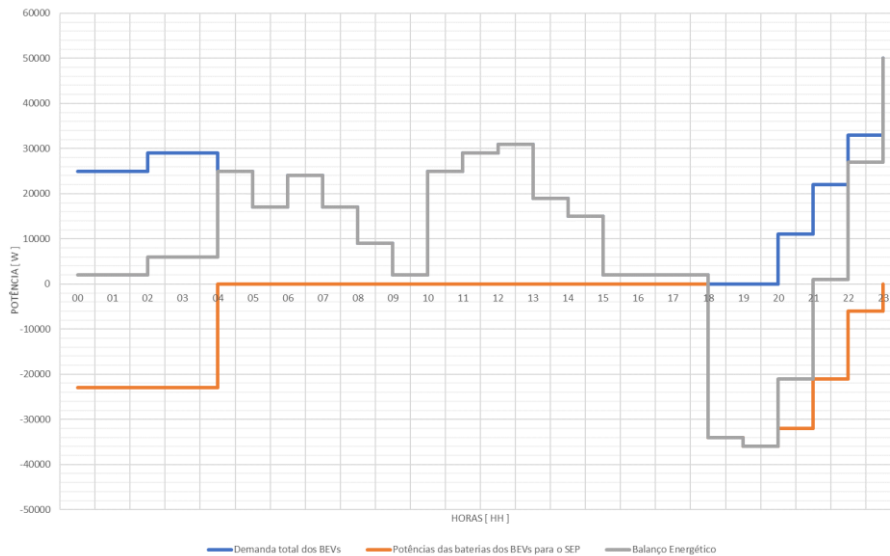


Figura 44: Balanço energético dos BEV no SEP – loop 2.

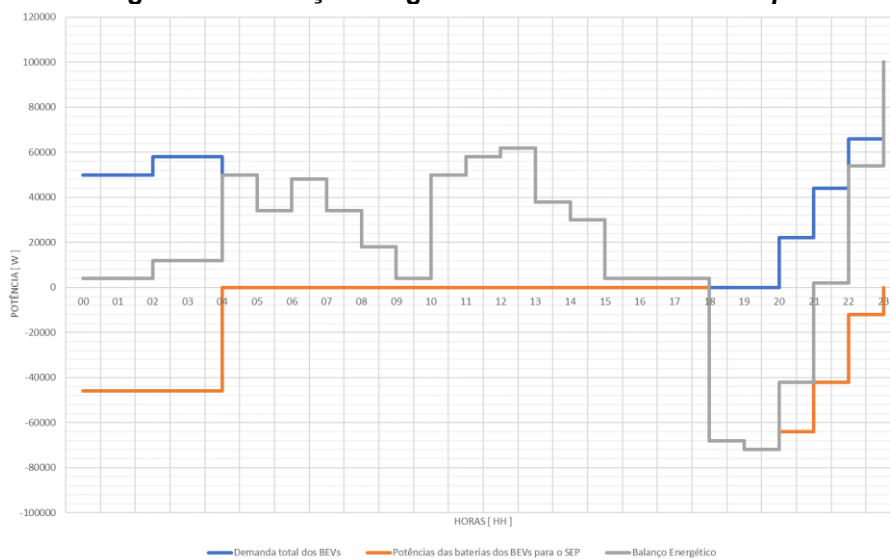
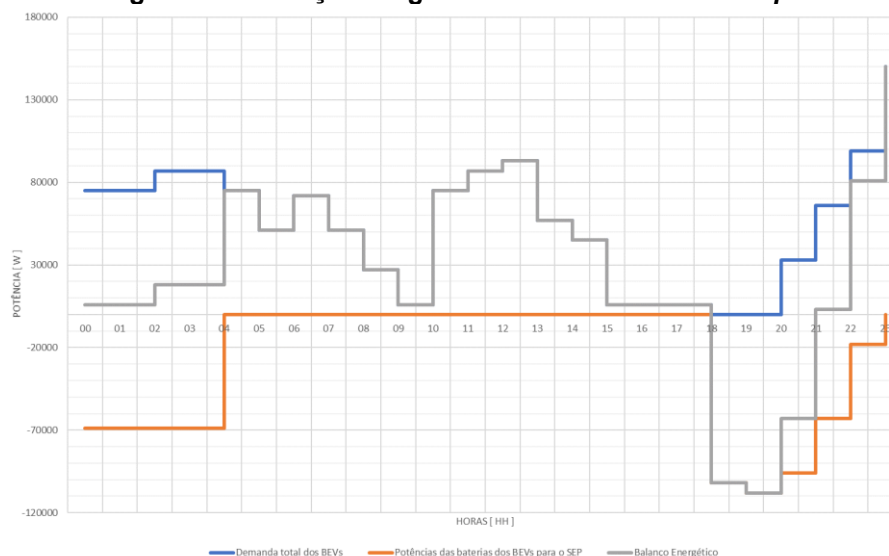


Figura 45: Balanço energético dos BEV no SEP – loop 3.



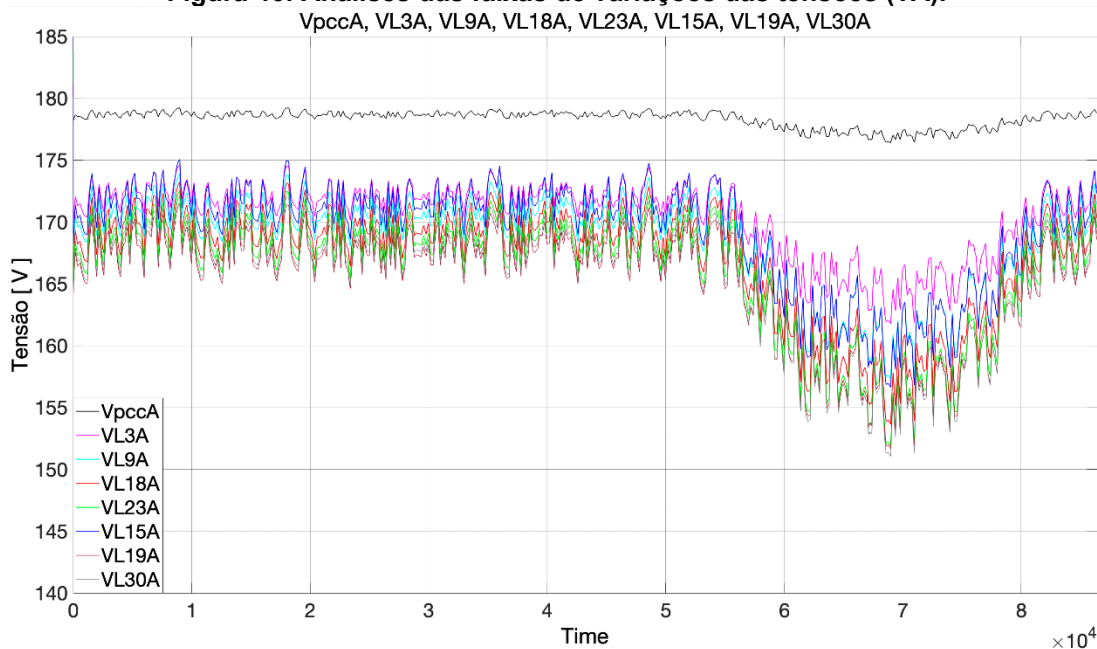
A Figura 46 apresenta as tensões nos nós de medição e controle na condição inicial. De acordo com a Faixa de Classificação de Tensões – Tensões de Regime Permanente da ANEEL, na Tabela 11, a tensão adequada nos pontos de alimentação de sistemas de baixa tensão pode variar de 92 a 105% da tensão nominal. Os valores limites da tensão nos pontos de conexão podem variar entre 87 e 106% da tensão nominal (ANEEL, 2018).

Tabela 11: Faixas aplicadas às tensões nominais inferiores a 1 kV.

Fonte: ANEEL, 2018.

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão Nominal (TN)
Adequada	$0,92 TN \leq TL \leq 1,05TN$
Precária	$0,87 TN \leq TL < 0,92TN$ ou $1,05TN < TL < 1,06TN$
Crítica	$TL < 0,87 TN$ ou $TL > 1,06TN$

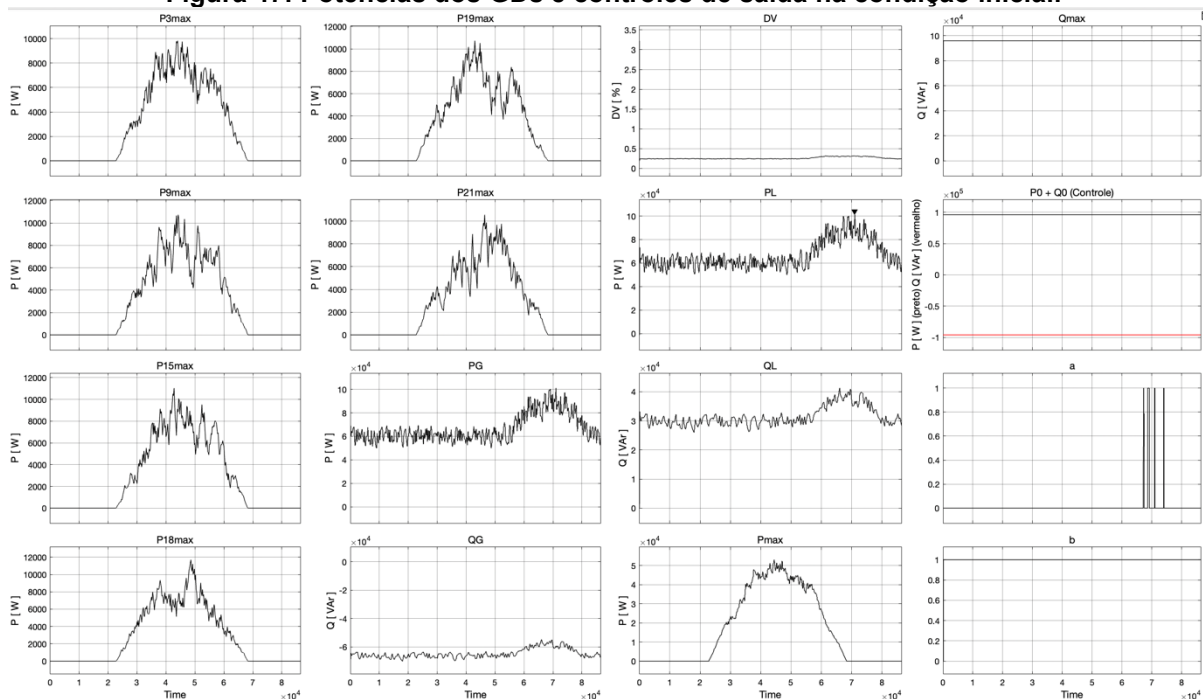
Figura 46: Análises das faixas de variações das tensões (TA).



A Figura 46 apresenta as TAs e observa-se o atendimento em relação aos níveis críticos sugeridos na especificação, isto é, $TA \geq 0,87$ (87%) de TN. O menor valor encontrado foram 0,86 (86%) de TN. Portanto, não foram propostas soluções para a mitigação dos níveis críticos de tensão. Os ajustes dos geradores distribuídos foram definidos para as gerações máximas de 96 kW ativo e -96 KVAR reativo (capacitivo).

O gráfico da Figura 47 apresenta as potências dos geradores distribuídos e os controles usados no SEP.

Figura 47: Potências dos GDs e controles de saída na condição inicial.



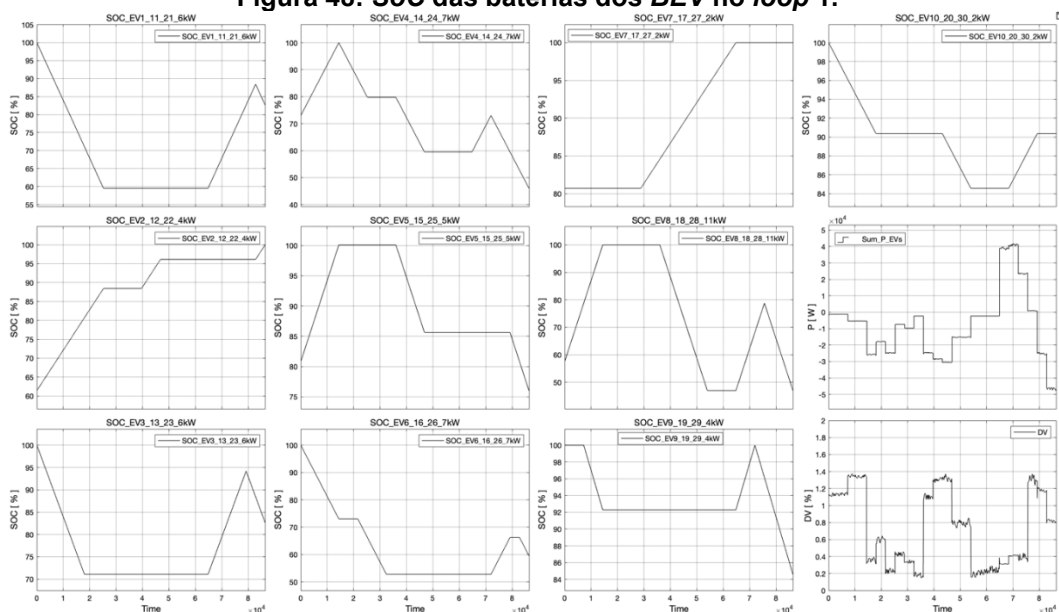
Nas medições acima:

- PG: potência ativa da rede e medida na saída do transformador;
- QG: potência reativa da rede e medida na saída do transformador;
- PGD: potência ativa dos geradores distribuídos;
- QGD: potência reativa dos geradores distribuídos;
- P(3, 9, 15, 18, 19, 21)max: são as potências de cada um dos geradores distribuídos conectados no SEP;
- Pmax: potência ativa máxima fornecida à rede, ou a soma das contribuições de cada um dos geradores distribuídos fornecem;
- Qmax: potência reativa máxima fornecida à rede, ou a soma das contribuições de cada um dos geradores distribuídos fornecem;
- P0: é a potência ativa de referência (96 kW) na rede;
- Q0: é a potência reativa de referência (-96 kVAr) na rede;
- PL = PG + PGD: potência ativa líquida do SEP;
- QL = QG + QGD: potência reativa líquida do SEP.

Os SoCs das baterias são apresentados na Figura 48 e é referente ao *loop* 1. As baterias que injetarão potência na rede iniciarão à 0 h com o estado de carga a 100%. As demais serão recarregadas e poderão chegar aos 100% até às 23:59 h. O SoC referente à energia necessária para os deslocamentos dos BEV não é considerado e são indicados os estados de carga referentes as conexões dos

veículos no sistema elétrico. O modelo referente às condições iniciais é apresentado na Figura 50, no denominador *loop* 1.

Figura 48: SoC das baterias dos BEV no *loop* 1.



O padrão e a demanda de recarga das baterias dos *BEV* se repetirão em diferentes nós dos SEP, conforme apresentado na Tabela 11 e nos sub gráficos Figura 49.

4.2. Resultados e discussões

Os resultados das simulações são mostrados nos gráficos a seguir. Os dados são expostos em quadros para realizar as comparações entre a condição inicial e os *loops* 1-3. Portanto, cada quadro é composto de 4 imagens. As Figuras 49-51 apresentam os modelos simulados para os 3 *loops* considerados o incremento das populações dos *BEV* em 1/3, 2/3 e 3/3 do SEP.

Figura 49: Modelo usado para as simulações no *loop* 1.

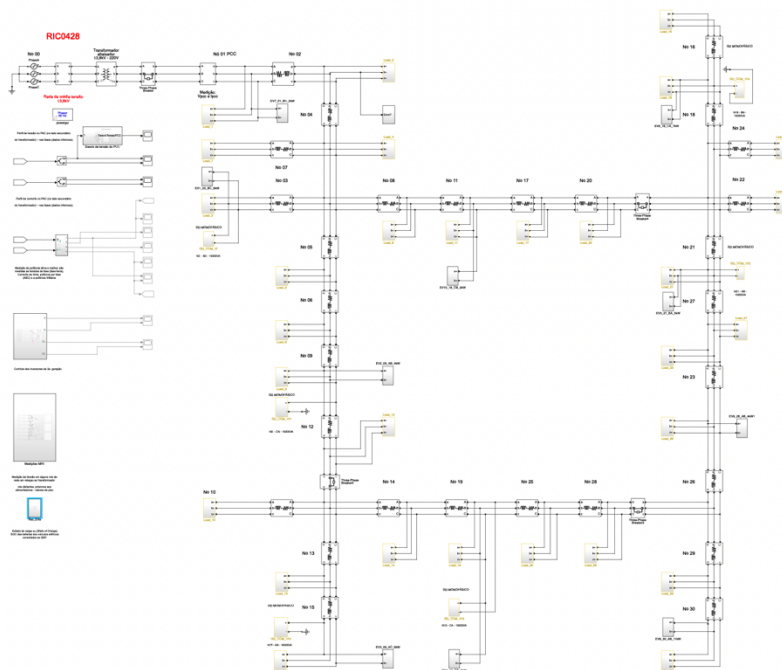


Figura 50: Modelo usado para as simulações no *loop 2*.

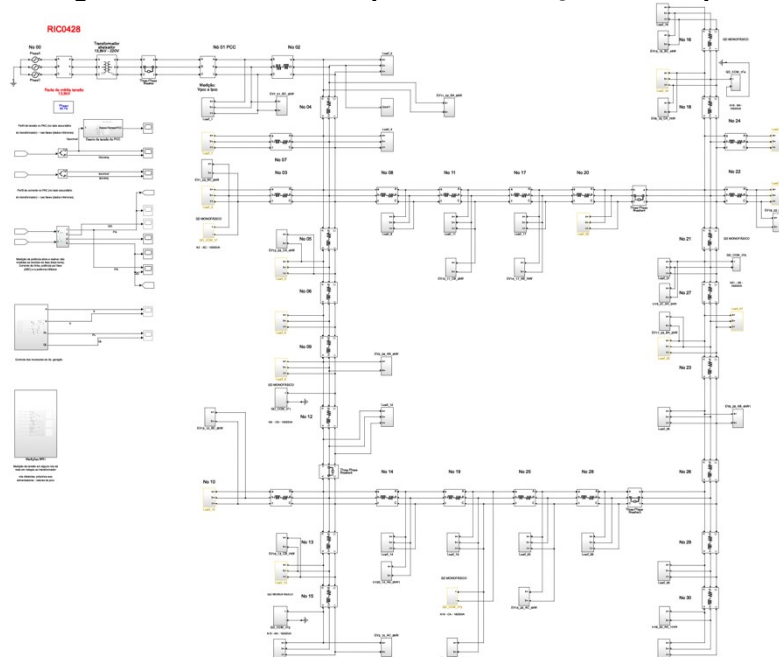
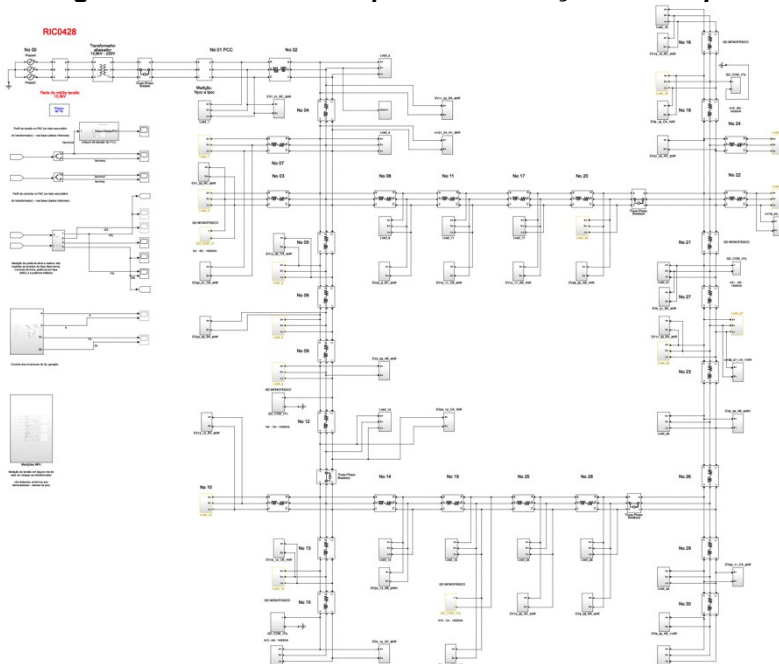


Figura 51: Modelo usado para as simulações no *loop 3*.

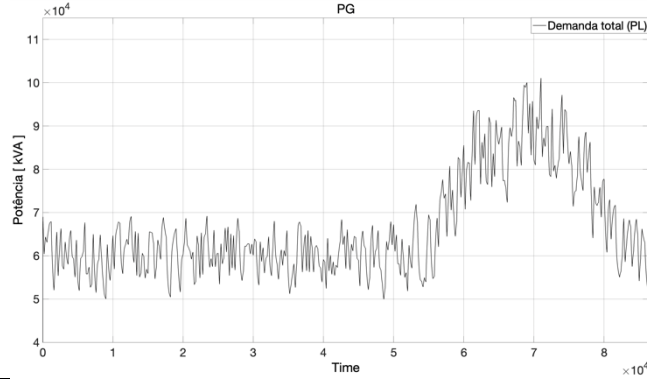


De acordo com os parâmetros iniciais do dimensionamento do SEP, a utilização da GD e a aplicação do conceito da capacidade de hospedagem da rede, o sistema elétrico comportaria a adição de todos os 30 *BEV*, sem a necessidade de redimensionamento do trafo de distribuição, conforme apresentado na Figura 52, partindo da premissa de otimização dos controles, análise da automação, comunicação e acionamentos remotos, para a mitigação da demanda, eliminação ou deslocamento da demanda típica de ponta. O fenômeno de deslocamento da demanda de ponta é notável a partir do *loop 2*, onde uma quantidade expressiva das baterias dos veículos elétricos iniciou o processo de carga e levaria o SEP ao colapso devido aos níveis críticos de tensão observados. O aumento da demanda impactará na qualidade de energia, ver Figura 53. As análises comparativas entre os

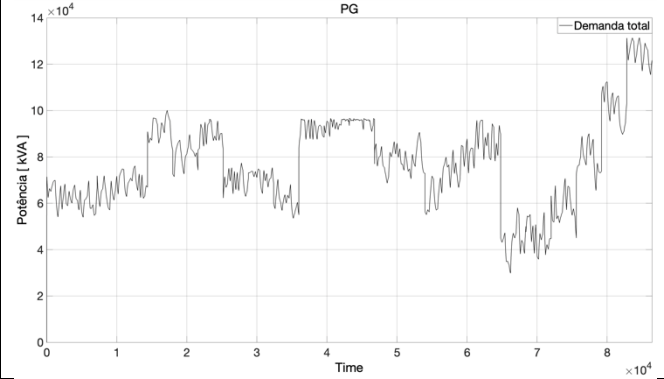
perfis de tensões e correntes no PCC são apresentadas nos gráficos das Figuras 54 e 55, respectivamente.

Figura 52: Análise da demanda da rede – pico da demanda.

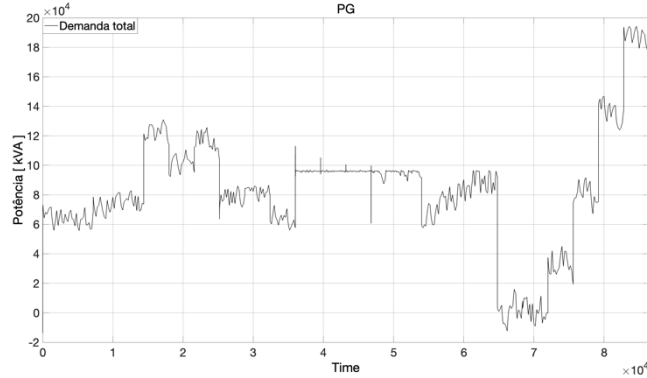
Condição inicial: 101,1 kVA



Loop 1: 131,4 kVA



Loop 2: 194,3 kVA



Loop 3: 275,9 kVA

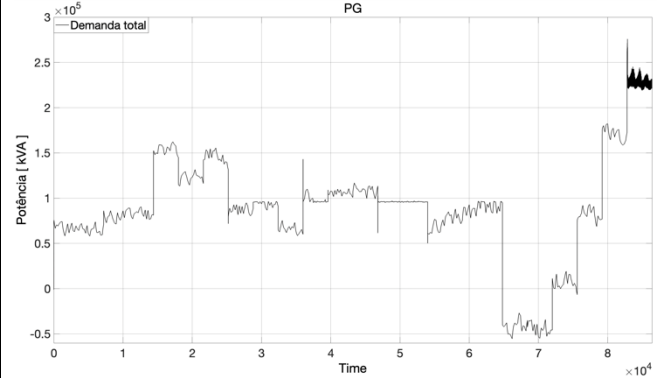
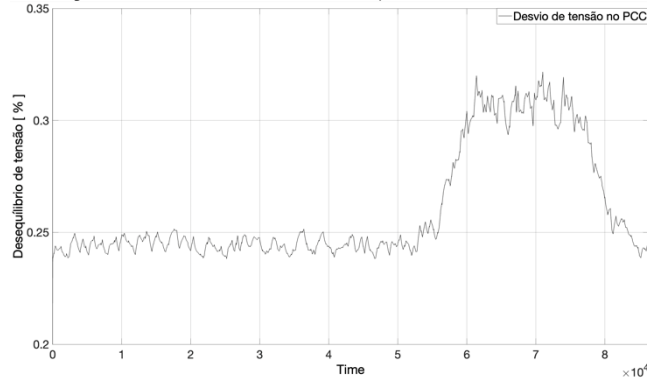
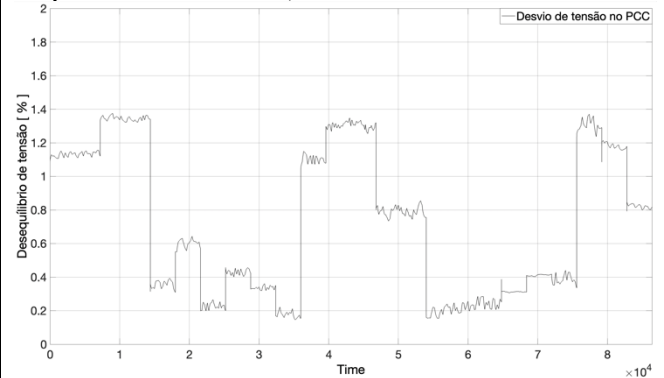


Figura 53: Análise do desvio de tensão (IEEE).

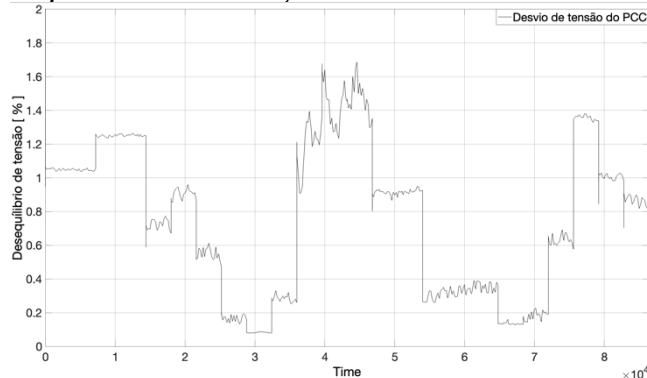
Condição inicial: desvio máximo = 0,322 %



Loop 1: desvio máximo = 1,375%



Loop 2: desvio máximo = 1,669%



Loop 3: desvio máximo = 2,454%

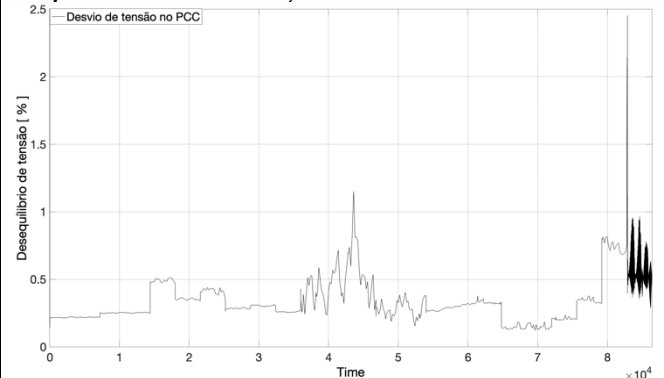


Figura 54: Análise da tensão no PCC.

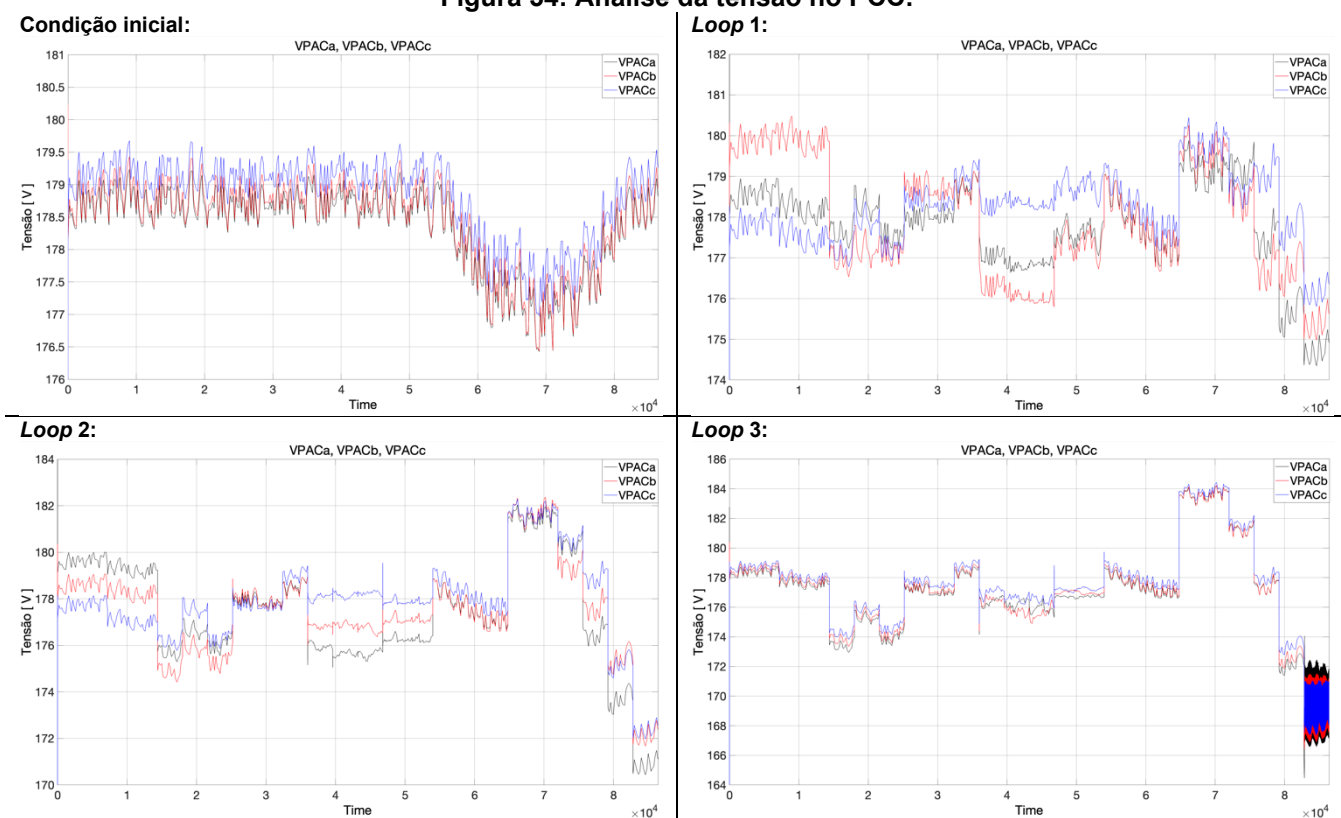
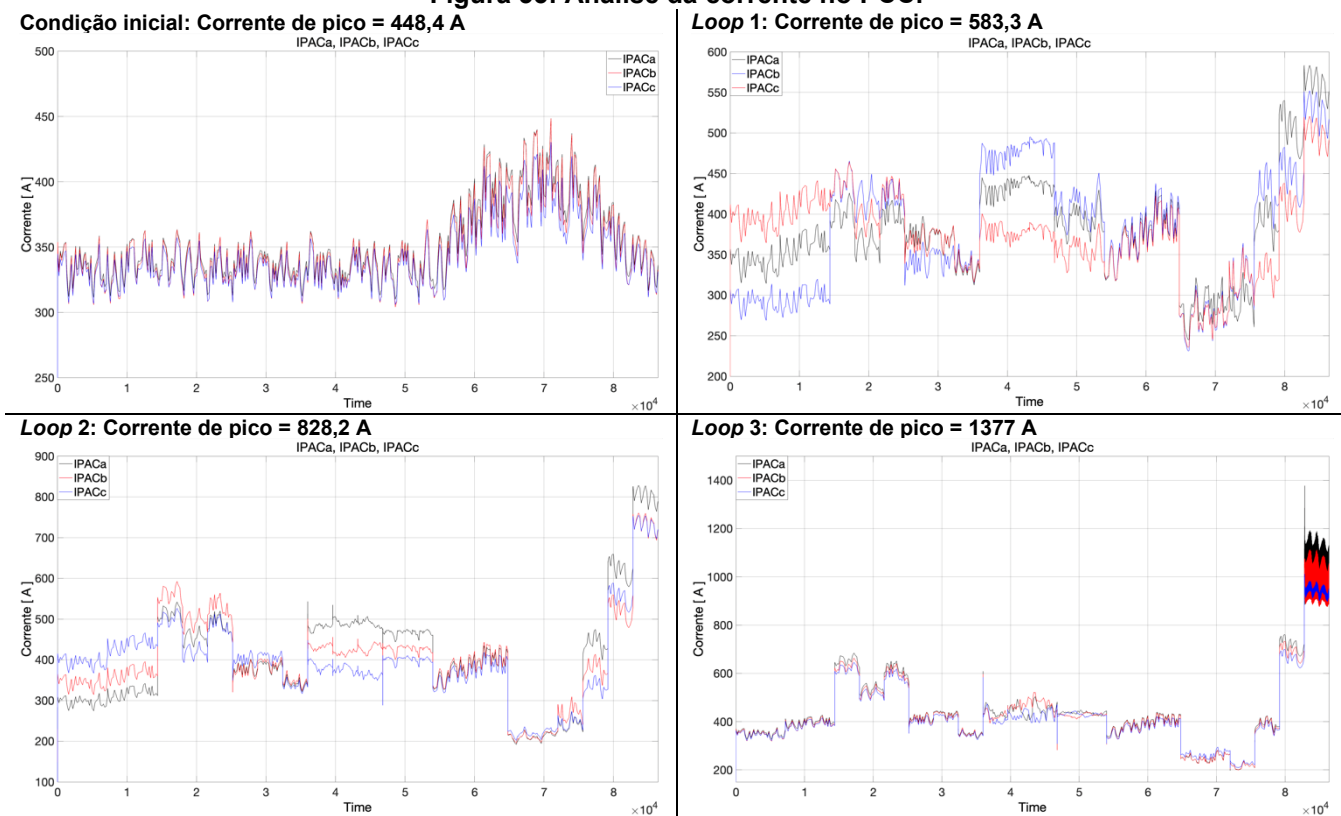


Figura 55: Análise da corrente no PCC.



O desequilíbrio de tensão no PCC é majorado em 7,6 vezes, quando comparado o *loop 3* com a condição inicial, mas é tolerável sob aspectos normativos (IEEE) ao alcançar 2,454 % quando o SEP é integralmente populado com os BEV.

Entretanto, é desejável o correto manejo e planejamento, aliando a aplicação de *hosting capacity*, GD e *smart grip*.

As TAs nos nós de controle são apresentadas na Figura 56. Cuidados adicionais são requeridos em virtude da distorção da tensão, corrente e conseqüentemente, da potência. As tensões de atendimento nos nós de controle do SEP apresentam níveis críticos e intervenções são necessárias devido ao risco de interrupção e colapso do fornecimento de energia, principalmente no *loop 3*, devido à sobre demanda para a recarga das baterias dos *BEV*. São constatados 58V instantâneos ou 41V eficaz, representando 32% de TN, isto é, a tensão de atendimento muito abaixo do limite crítico.

Além das intervenções para evitar, ou mitigar a interrupção de fornecimento, o sistema de proteção deve ser revisitado relacionando todos os níveis de subtensão, sobretensão, subcorrente e sobrecorrente, expostos nas Figuras 54 e 55, seja por demanda das cargas ou pela injeção de potência das baterias dos *BEV* no SEP.

Os controles usados na condição inicial e *loops 1-3* para a geração distribuída são apresentados na Figura 57 e são detalhados os controles das variáveis do SEP, potência unitária de cada GD, desvio de tensão, potência ativa e reativa de controle, além das potências ativas e reativas líquidas.

Figura 56: Análises das tensões de atendimento no SEP.

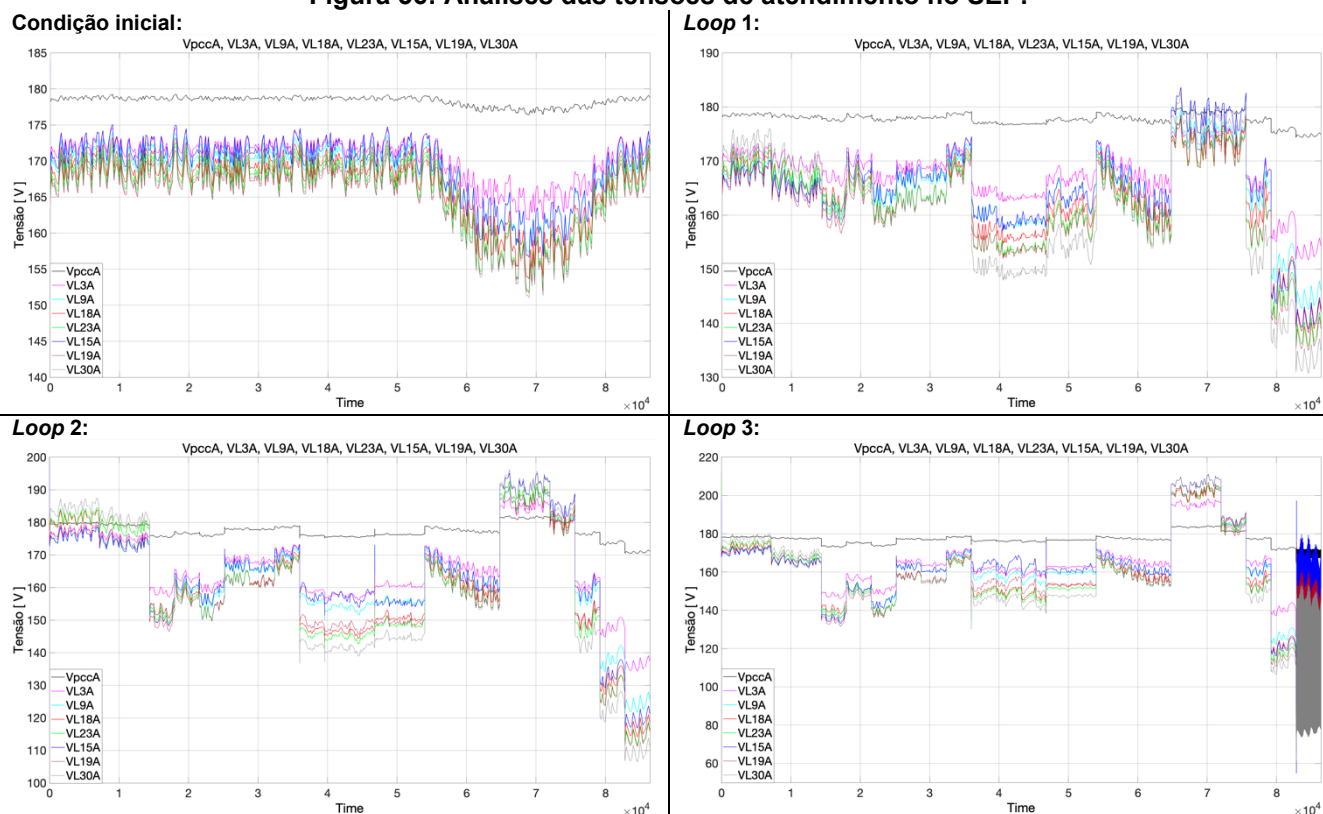
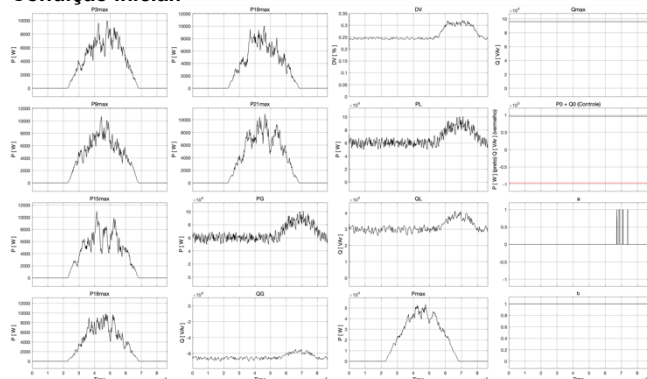
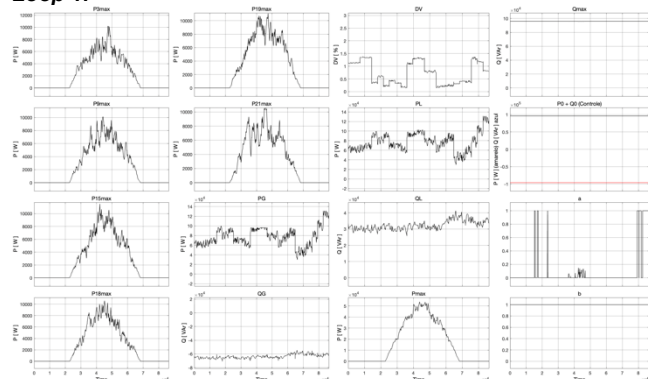


Figura 57: Análises das potências e controles dos GDs na condição inicial.

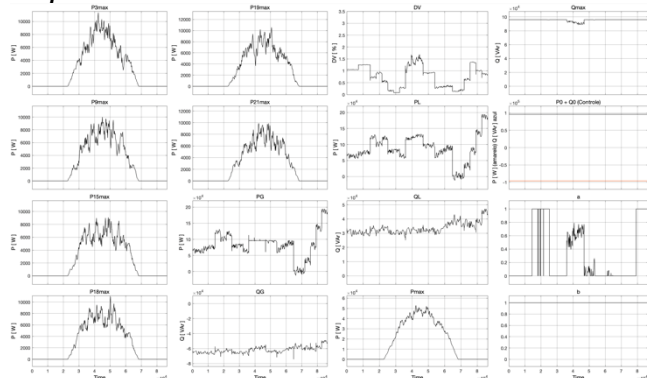
Condição inicial:



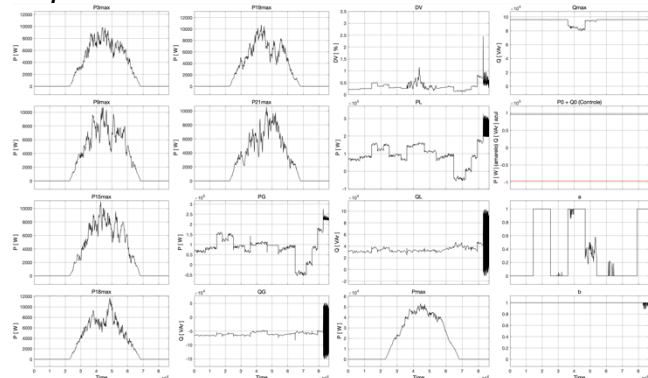
Loop 1:



Loop 2:



Loop 3:



5. CONCLUSÃO

As soluções propostas e exploradas neste trabalho analisaram os impactos no Sistema Elétrico de Potência, na transição de matrizes energéticas, comutando das fontes fósseis para a elétrica, visando a mobilidade urbana para otimização dos recursos energéticos, dados os rendimentos das propulsões *BEVs* em relação aos *ICE*. Foram usadas as tecnologias de geração distribuída, unidas às *smart grids*, *hosting capacity*, onde a capacidade de armazenamento será provida por meio das baterias dos *BEV* para a recarga ou fornecimento de potência no SEP e os geradores fotovoltaicos de terceira geração para contribuir com as potências ativa e reativa, além do alimentador. Quando considerados dois terços do condomínio residencial, nas análises quantitativas e qualitativas, com a adição dos veículos elétricos, observou-se o desequilíbrio da tensão dentro dos parâmetros aceitáveis, isto é, 1,56%. Contudo os níveis das tensões de atendimento são críticas, já no *loop* 1, com um terço da população de veículos elétricos no SEP. São necessárias melhorias para majorar os níveis de tensão de atendimento, como otimização das técnicas de controle, por meio de informações obtidas em medições usando telecomunicações no PAC, para as devidas regulações das potências reativas ou capacitiva injetadas pelos geradores fotovoltaicos, podendo ser tratado em trabalhos futuros. Estudos adicionais podem ser desenvolvidos para as verificações do comportamento da rede elétrica e a utilização de geradores de primeira geração.

As considerações finais das análises podem ser sintetizadas, quando comparadas a condição final em relação a inicial, isto é, o *loop* 3 em relação a condição inicial, e são constatadas as degradações dos perfis de tensão, majorado em 7,6 vezes, elevação da corrente de pico em 307% e decaimento da TA de 0,86 para 0,32. Há o ganho da capacidade de armazenamento. Contudo, além do afundamento de tensão durante as recargas simultâneas dos *BEV* é verificado o aumento do desequilíbrio de tensão, principalmente nos nós mais distantes do PAC, com o agravante adicional, pois as unidades de recarga das baterias são monofásicas. As conexões de cargas adicionais ao SEP devem ser supervisionadas pelas concessionárias de energia para garantir o balanceamento de cargas entre as fases e a constatação da capacidade de atendimento da infraestrutura (cabos, transformadores, equipamentos, medidores, proteção, automação) devido as novas demandas. Portanto, a mudança de matrizes energéticas no contexto da mobilidade urbana requer atenção, principalmente quando analisadas as aplicações em escala, conforme proposto neste trabalho.

BIBLIOGRAFIA

Ahmed, A. S., Abdullah, B. A., Abdelaal, W. G. A. (2016), MPPT algorithms: Performance and evaluation, 11th International Conference on Computer Engineering & Systems (ICCES), pp. 461-467. DOI: 10.1109/ICCES.2016.7822048

Aneel - Cadernos Temáticos. (2016), Micro e Minigeração Distribuída, Sistema de Compensação de Energia Elétrica, 2ª edição, maio 2016. Disponível em: < <https://www.gov.br/aneel/pt-br> >. Acesso em: 27 de maio de 2022.

Aneel - Nota Técnica nº 0056/2017-SRD/ANEEL. (2017), Atualização das projeções de consumidores residenciais e comerciais com microgeração solar fotovoltaicos no horizonte 2017-2024, 24 de maio de 2017.

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. (2018) Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. Disponível em: < <http://www.cerpro.com.br/publico/arquivos/prodist/Modulo8.pdf> >. Acesso em: 11 de junho de 2022.

Audi, Alemanha. (2022), Audi Technology Portal, Drivetrain: Electric drives. Disponível em: < <https://www.audi-technology-portal.de/en/drivetrain> >. Acesso em: 20 de maio de 2022.

Audi, Brasil. (2021), e-tron. Perguntas e Respostas. Disponível em: < <http://www.audi.com.br> >. Acesso em: 27 de dezembro de 2021.

Bauer, P., Zhou, Y., Doppler, J., Stembridge, N. (2010), Charging of electric vehicles and impact on the grid, 13th Mechatronika 2010, pp. 121-127.

Boroyevich, D., Cvetković, I., Dong, D., Burgos, R., Wang, F., Lee, F. (2010), Future electronic power distribution systems a contemplative view, 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, pp. 1369-1380. DOI: 10.1109/OPTIM.2010.5510477

Brandão, D. I. (2013), Sistema de geração fotovoltaico multifuncional. pp.1-144. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia de Bauru. Disponível em: < <http://hdl.handle.net/11449/87209> >. Acesso em: 27 de dezembro de 2021.

Cabezuelo, D., Andreu, J., Kortabarria, I., Alegría, I. M., Robles, E. (2017), Powertrain systems of electric, hybrid and fuel-cell vehicles: State of the technology, IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), pp. 1445-1450. DOI: 10.1109/ISIE.2017.8001458

Costa, E., Seixas, J. (2014), Contribution of electric cars to the mitigation of CO2 emissions in the city of Sao Paulo. Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC; Sponsor: et al.; IEEE VTS; iNESC Coimbra; ISEC Engenharia; Politecnico de Coimbra; Universidade de Coimbra. DOI: 10.1109/VPPC.2014.7007035

Costa, E., Seixas, J., Costa, G., Turrentine, T. (2017), Interplay between ethanol and electric vehicles as low carbon mobility options for passengers in the municipality of São Paulo, International Journal of Sustainable Transportation, 11:7, 518-525. DOI: 10.1080/15568318.2016.1276651

Costa, E., Vanhaverbeke, L., Coosemans, T., Seixas, J., Messagie, M., Costa, G. (2019), Optimizing The Location Of Charging Infrastructure For Future Expansion Of Electric Vehicle In Sao Paulo, Brazil. IEEE International Smart Cities Conference (ISC2), pp. 632-637. DOI: 10.1109/ISC246665.2019.9071676.

Cui, S., Han, S., Chan, C. (2014), Overview of multi-machine drive systems for electric and hybrid electric vehicles, IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, pp. 1-6.

Deckmann, S. M., Pomilio, J. A. (2020), IT – 012 IT: Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica. UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia e Computação. UNICAMP/FEEC/DSE, pp. 1-15.

Ehsani, M., Gao, Y., Emadi, A. (2009), Modern Electric Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals Theory and Design, CRC Press.

Electricasgoneaudi.net. (2022), Audi e-tron battery. Disponível em: < <https://electricasgoneaudi.net/models/e-tron/drivetrain/battery/> >. Acesso em: 20 de maio de 2022.

EPA – United States: Environmental Protection Agency. (2022), Distributed Generation of Electricity and its Environmental Impacts. Disponível em: < <https://www.epa.gov/energy/distributed-generation-electricity-and-its-environmental-impacts> >. Acesso em: 25 de maio de 2022.

EPE: Empresa de Pesquisa Energética. (2002), Comitê Coordenador do Planejamento da Expansão dos Sistemas Elétricos. Volume II. Critérios e Procedimentos para o Planejamento da Expansão dos Sistemas de Transmissão. Critérios e Procedimentos para o dimensionamento de Interligações entre Submercados. Comitê de revitalização do Modelo do Setor Elétrico – Tema 24. Disponível em: < <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-482/Crit%C3%A9rios%20de%20Planejamento%20de%20Expans%C3%A3o%20-%20ccpe-ctet056.pdf> >. Acesso em: 27 de maio de 2022.

Hawkins, T. R., Singh, B., Majeau-Bettez, G., Strømman, A. H. (2013), Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles. *Journal of Industrial Ecology*, vol. 17, no. 1, pp. 53–64.

Holdren, J. P. (1991), Population and the Energy Problem. *Population and Environment: A Journal of Interdisciplinary Studies*, Vol. 12, no. 3: 231-55.

IEEE. (1987), Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications, ANSI/IEEE Std 446-1987, vol., no., pp.1-272.
DOI: 10.1109/IEEESTD.1987.120315

Júnior, J. R. S. (2022), Microrredes despacháveis de baixa tensão: múltiplos serviços ancilares. pp.1-179. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. Disponível em: < <https://www.ppgee.ufmg.br/defesas/1702D.PDF> >. Acesso em: 27 de maio de 2022.

Kolantla, D., Mikkili, S., Pendem, S.R., Desai, A.A. (2020), Critical review on various inverter topologies for PV system architectures. *IET Renew. Power Gener.*, 14: 3418-3438.
DOI: 10.1049/iet-rpg.2020.0317

Mahmoudi, C., Flah, A., Sbita, L. (2014), An overview of electric vehicle concept and power management strategies, *International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb*, pp. 1-8, 2014.
DOI: 10.1109/CISTEM.2014.7077026

Medeiros, N. D. O., Falcão, D. M. (2018), Photovoltaic micro and mini generation hosting capacity assessment in distribution grids, *Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)*, pp. 1-6.
DOI: 10.1109/SBSE.2018.8395603.

Mercedes-Benz. (2022), O WLTP. Disponível em: < <https://www.mercedes-benz.pt/passengercars/mercedes-benz-cars/wltp/wltp/overview/higher-measured-values.module.html> > Acesso em: 20 de maio de 2022.

Mierlo, J. V., Lebeau, K., Messagie, M., Macharis, C. (2013), Electric Vehicles: Environmental friendly and affordable?. *Electromobilitéit op de weg. Revue E tijdschrift– 129ste jaargang/129ème*, vol. 4.

NHTSA - National Highway Traffic Safety Administration, Estados Unidos. (2022), The 2019 Audi e-tron Introduction. Disponível em: < <https://static.nhtsa.gov/odi/tsbs/2019/MC-10155750-9999.pdf> >. Acesso em: 20 de maio de 2022.

NIST – National Institute of Standards and Technology. Smart Grid: A Beginner's Guide – 5W2H (2012-2019), Disponível em: < <https://www.nist.gov/el/smart-grid/about-smart-grid/smart-grid-beginners-guide> >. Acesso em: 27 de maio de 2022.

Pinto, R. J. C., Pombo, J., Calado, M. R. A., Mariano, S. J. P. S. (2015), An electric vehicle charging station: Monitoring and analysis of power quality. 9th International Conference on Compatibility and Power Electronics (CPE), pp. 37-42.
DOI: 10.1109/CPE.2015.7231046

Pirbazari, A. M. (2010), Ancillary service definitions, markets and practice in the world, IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T&D-LA), pp. 32-36.
DOI: 10.1109/TDC-LA.2010.5762857

Ravindranath., T. Y., Anuradha, K., Rajani, K., Chandra, S. K. (2022), A review on energy efficient technologies for electric vehicle applications, Journal of Energy Storage, Volume 50.
DOI: 10.1016/j.est.2022.104212.

Selvakumar, S. G. (2021), Electric and Hybrid Vehicles – A Comprehensive Overview, IEEE 2nd International Conference On Electrical Power and Energy Systems (ICEPES), 2021, pp. 1-6.
DOI: 10.1109/ICEPES52894.2021.9699557

Smith, M., Ton, D. (2013), Key Connections: The U.S. Department of Energy's Microgrid Initiative, in IEEE Power and Energy Magazine, vol. 11, no. 4, pp. 22-27, July-Aug. 2013.
DOI: 10.1109/MPE.2013.2258276

Srinivasarangan Rangarajan, S., Sharma, J., Sundarabalan, C.K. (2020), Novel Exertion of Intelligent Static Compensator Based Smart Inverters for Ancillary Services in a Distribution Utility Network-Review. Electronics, 9, 662.
DOI: 10.3390/electronics9040662

Tao, Q. Li S., Xiao, X., Wen, J. (2013), Monitoring and analysis of power quality in electric vehicle charging stations. 1st International Future Energy Electronics Conference (IFEEEC), pp. 277-282.
DOI: 10.1109/IFEEEC.2013.6687516

Ton, D. T., SMITH, M. A. T. (2012) The US department of energy's microgrid initiative. The Electricity Journal, Elsevier, v. 25, n. 8, p. 84–94.
DOI: 10.1016/j.tej.2012.09.013

Whitehead, J., Smit, R., Washington, S. (2018), Where are we heading with electric vehicles?. Air Quality and Climate Change, Volume 52 No.3, pp: 18-27.

Wu, G., Zhang, X., Dong, Z. (2015), Powertrain architectures of electrified vehicles: review classification and comparison, Journal of the Franklin Institute, vol. 352, no. 2, pp. 425-448.
DOI: 10.1016/j.jfranklin.2014.04.018

Zilles, R., Macêdo, W. N., Galhardo, M. A. B., Oliveira, S. H. F. (2012), Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. – São Paulo: Oficina de Textos (248 p.). Coleção aplicações da energia solar fotovoltaica. ISBN 978-85-7975-052-6.