

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

DANILO DA COSTA

**ESTAÇÕES DE RECARGA PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS ALIMENTADAS POR
ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA: ESTUDO DE CASO PARA RODOVIA BR-381
FERNÃO DIAS EM 2030**

ITAJUBÁ

2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

DANILO DA COSTA

**ESTAÇÕES DE RECARGA PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS ALIMENTADAS POR
ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA: ESTUDO DE CASO PARA RODOVIA BR-381
FERNÃO DIAS EM 2030**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Energia como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia de Energia.

Área de concentração: Sistemas Energéticos

Orientador: Prof. Dr. Vladimir Rafael Melian Cobas

ITAJUBÁ

2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

DANILO DA COSTA

**ESTAÇÕES DE RECARGA PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS ALIMENTADAS POR
ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA: ESTUDO DE CASO PARA RODOVIA BR-381
FERNÃO DIAS EM 2030**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 16 de abril de 2021, conferindo ao autor o título de *Mestre em Ciências em Engenharia de Energia*.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Vladimir Rafael Melian Cobas (orientador)

Prof. Dr. Marcelo José Pirani

Prof. Dr. Luiz Carlos Vieira Guedes

ITAJUBÁ

2021

DEDICATÓRIA

A Deus.

Aos meus pais, João e Margarida.

A minha esposa, Daniela.

A minha filha que vai nascer, Heloísis.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por sua proteção e força espiritual durante toda esta caminhada, sem a qual certamente eu não teria conseguido superá-la.

Agradeço aos meus pais, João e Margarida, por serem meus primeiros educadores e terem me fornecido as bases de uma educação sólida, permeada por valores éticos e dotada de amor e carinho.

Agradeço ao meu irmão, Bruno, pelo companheirismo e pelas conversas sobre os planos de vida.

Agradeço a minha esposa, Daniela, pela compreensão e total apoio durante esta jornada e por segurar minha mão nos momentos de dificuldades.

Agradeço aos meus professores da graduação no Grupo Unis, que me colocaram nos trilhos da Engenharia e me mostraram o quão empolgante este campo do conhecimento pode ser.

Agradeço ao meu professor e orientador Vladimir, pelos ensinamentos e conselhos oferecidos sempre de bom grado e pela condução deste trabalho, sempre de forma cuidadosa e comprometida.

Agradeço aos professores presentes nas bancas de qualificação e defesa da dissertação, pelo seu tempo emprestado em ler este trabalho e avaliá-lo de forma justa e construtiva.

Agradeço aos demais professores do curso de pós-graduação em Engenharia de Energia, pelos conhecimentos transmitidos e pelos exemplos de vida.

Por fim, agradeço aos meus colegas de mestrado, especialmente ao amigo York, por toda a ajuda e esclarecimentos prestados, que contribuíram diretamente para esse momento.

EPÍGRAFE

*“A mente que se abre a uma nova ideia jamais
voltará ao seu tamanho original.”*

Albert Einstein

RESUMO

Diversos estudos climáticos e energéticos realizados nos últimos anos sugerem que o modelo energético atual deve passar por uma forte transição de forma a aumentar a participação das fontes renováveis na matriz energética mundial, devido principalmente a dois motivos: a escassez dos combustíveis fósseis que aumenta gradativamente e os impactos climáticos negativos provenientes das emissões atmosféricas resultantes da queima destes combustíveis. De uma forma geral, os setores de geração de eletricidade e de transportes são aqueles que mais utilizam combustíveis fósseis e, conseqüentemente, são os maiores responsáveis pelas emissões atmosféricas de gases de efeito estufa e outros poluentes. Neste contexto, a integração entre os veículos elétricos e as usinas fotovoltaicas pode desempenhar um papel importante para a redução das emissões e aumento do uso de energias renováveis, através da substituição dos combustíveis fósseis por energia elétrica gerada a partir de fonte renovável e limpa, o Sol. O presente trabalho apresenta um estudo de caso para a alocação de estações de recarga alimentadas por usinas fotovoltaicas para a rodovia brasileira Fernão Dias. Para este fim, um modelo de previsão de demanda foi adotado para a elaboração de três cenários para 2030, com diferentes níveis de participação dos veículos elétricos no mercado brasileiro. Um modelo de alocação otimizada foi utilizado para definir a posição e número de estações de recarga necessárias e usinas fotovoltaicas foram dimensionadas para atender a demanda destinada à recarga dos veículos elétricos através do software PVSystTM. Os resultados mostram uma lista de locais adequados para a instalação das estações de recarga, além da análise da eletricidade consumida e das emissões de gases de efeito estufa evitadas. Uma análise financeira foi conduzida para determinar os custos de recarga com base em uma taxa interna de retorno de 10%. Estes custos foram comparados com os custos referentes ao abastecimento de veículos convencionais com diferentes combustíveis. Os resultados apontam que os custos encontrados neste trabalho podem ser até 74% menores do que os custos de abastecimento de automóveis convencionais atuais. Por fim, os resultados deste estudo podem oferecer uma referência para políticas públicas e investidores interessados no campo das recargas rápidas de veículos elétricos a partir de energia solar.

Palavras-chave: Veículos elétricos, alocação de estações de recarga rápidas, mercado brasileiro de veículos elétricos, energia solar.

ABSTRACT

Several climate and energy studies carried out in recent years suggest that the current energy model might suffer a strong transition in order to increase the share of renewable sources in the world energy matrix, mainly due to two reasons: the increasing scarcity of fossil fuels and the negative climatic impacts from atmospheric emissions resulting from the burning of these fuels. In general, the electricity generation and transport sectors are the greater fossil fuels consumers and, consequently, are the most responsible for the atmospheric emissions of greenhouse gases and other pollutants. Integrating electric vehicles and photovoltaic power stations may play an important role in substituting fossil fuels. This study presents a case study on plants to place charging stations fed by photovoltaic power stations along the Fernão Dias highway in Brazil. A demand model was adopted to elaborate three scenarios for 2030 with different participation levels of electric vehicles in the Brazilian market. An optimized allocation model was used to derive the position and number of charging stations and photovoltaic power plants that would be need to meet the demand for recharging electric vehicles. This was done using the PV SystTM software program. The results gave a list of adequate locations for installing the charging stations and offered analyses on the consumed electricity and greenhouse gas emissions that could be abated by said actions. The financial analysis that was conducted for the case study determined that the charging costs, based on an Internal Rate of Return calculations, were 10%. These costs were compared to the fill up costs of other traditional vehicles. The results show that the costs may be 74% less than the cost of refilling current conventional automobiles. Finally, the results of this study may serve as a reference in the public policy debate, as well as for investors interested in fast charging EV stations that use solar energy.

Keywords:

Electric vehicles, fast charging station location, Brazilian electric vehicle market, solar energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Análise <i>Well to Wheel</i> de eficiência: veículo a Diesel vs veículo elétrico.....	25
Figura 2.2 – Análise <i>Well to Wheel</i> para emissões líquidas e evitadas de GEE para frota de VEs por modo e emissões totais de GEE do setor de transportes.	26
Figura 2.3 – Composição dos VEs.	27
Figura 2.4 – Veículo elétrico desenvolvido em 1884.....	28
Figura 2.5 – Fluxo de potência do HEV em série.	31
Figura 2.6 – Fluxo de potência do HEV em paralelo.	32
Figura 2.7 – Fluxo de potência do HEV série-paralelo.	33
Figura 2.8 – Componentes de um BEV.....	34
Figura 2.9 – Configuração de um trem de força de FCEV.....	35
Figura 2.10 – Frações estimadas de vendas de veículos comerciais leves ao longo do tempo.....	36
Figura 2.11 – Classificação de motores para VEs.....	38
Figura 2.12 – Gráfico de Ragone de diferentes tipos de tecnologia de armazenamento de energia.	40
Figura 2.13 – Fluxo energético de um VE sem e com frenagem regenerativa.....	43
Figura 2.14 – EMSCS empregadas em um HEV.	45
Figura 2.15 – Evolução das vendas de VEs e <i>market share</i> nos principais mercados do mundo.	46
Figura 2.16 – Cenários de projeção para frota de VEs e vendas até 2030.	47
Figura 2.17 – Projeções de VEs no mundo até 2030.....	48
Figura 2.18 – Evolução do número de VEs licenciados no Brasil e frota acumulada estimada.	48
Figura 2.19 – Cenários de penetração de veículos CI, híbridos e VEs no total de licenciamento de veículos leves no Brasil.	49
Figura 2.20 – Curva característica de tensão e corrente durante a recarga de uma bateria.	52
Figura 2.21 – Evolução do número de ERVEs no mundo entre 2013 a 2018.....	53
Figura 2.22 – Conector de recarga Tipo 1 SAE J1772.....	58
Figura 2.23 – Conector de recarga tipo 2 Mennekes.....	58
Figura 2.24 – Conector de recarga CHAdeMO.....	59
Figura 2.25 – Conector de recarga CCS Combo Tipo 1 (esquerda) e Tipo 2 (direita).....	60
Figura 2.26 – Conector de recarga Tesla.....	60

Figura 2.27 – Estrutura de custos e receitas de uma ERVE pública.	65
Figura 2.28 – ERVEs públicas instaladas por país em 2018.	67
Figura 2.29 – Curvas de carga líquida típicas em diferentes cenários em rede de distribuição residencial com participação de FV e VE.	68
Figura 2.30 – Arquitetura de sistema nº1 para recarga VE-FV.....	70
Figura 2.31 – Arquitetura de sistema nº2 para recarga VE-FV.....	71
Figura 2.32 – Arquitetura de sistema nº3 para recarga VE-FV.....	72
Figura 2.33 – Diagrama de blocos de um MPC para arquitetura de sistema nº3.	72
Figura 2.34 – Arquitetura de sistema nº4 para recarga VE-FV.....	73
Figura 2.35 – Diagrama de blocos de um MPC para a arquitetura de sistema nº 4.	73
Figura 3.1 – Fluxograma com metodologia proposta.....	75
Figura 3.2 – Frota circulante projetada para 2030.....	78
Figura 3.3 – Ajuste dos parâmetros do modelo de Bass.....	80
Figura 3.4 – Cenários de projeção para frota de veículos elétricos em 2030.....	80
Figura 3.5 – Representação gráfica da rodovia Fernão Dias.....	83
Figura 3.6 – Mapa de disponibilidade – cidade de Três Corações.....	90
Figura 3.7 – Área ocupada por UFVs.....	91
Figura 3.8 – Possível localização de UFV de 30 ha para atendimento de SV1 ou SV6 cenário Acelerado.....	92
Figura 4.1 – Alocação das áreas de serviço e estações de recarga.	100
Figura 4.2 – Consumo de eletricidade por área de serviços.	102
Figura 4.3 – Emissões de CO ₂ potencialmente evitadas pelo uso das UFVs por área de serviço.	102
Figura 4.4 – Redução de emissões de NO _x , NMCH e CO pelos veículos elétricos na rodovia Fernão Dias.....	103
Figura 4.5 – Redução da emissão de CO ₂ e Custo Social do Carbono.....	104
Figura 4.6 – Custo da recarga de veículos elétricos na Fernão Dias.....	105
Figura 4.7 – Comparativo entre custos de abastecimento para diferentes combustíveis.	106
Figura D.1 – Relatório de dimensionamento de UFV 5 MW – folha 1.	125
Figura D.2 – Relatório de dimensionamento de UFV 5 MW – folha 2.	126
Figura D.3 – Relatório de dimensionamento de UFV 5 MW – folha 3.	127

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Modos de recarga conforme IEC 61851-1.....	55
Tabela 2.2 – Tipos de conectores e níveis de recarga CA e CC.....	57
Tabela 3.1 – Parâmetros para o modelo de DGS.....	78
Tabela 3.2 – Parâmetros para modelo de Difusão de Bass.....	80
Tabela 3.3 – Fluxos projetados diários de veículos elétricos na rodovia Fernão Dias por cenário em 2030.	82
Tabela 3.4 – Características técnicas dos veículos puramente elétricos registrados no Brasil.	86
Tabela 3.5 – Parâmetros para modelo de alocação de estações de recarga.	86
Tabela 3.6 – Localização das áreas de serviço e número de estações de recarga por cenário.	87
Tabela 3.7 – Usinas fotovoltaicas destinadas as áreas de serviço.	91
Tabela 3.8 – CAPEX e OPEX por área de serviço.....	98
Tabela 4.1 – Fluxos projetados de veículos elétricos na rodovia Fernão Dias em 2030.....	99
Tabela 4.2 – Indicadores financeiros referentes a cada área de serviço.	105
Tabela A.1 – Frota projetada de VEs.	122
Tabela B.1 – Dados históricos de frota pedagiada na Fernão Dias e relação entre frota pedagiada e frota circulante.	123
Tabela C.1 – Frota pedagiada projetada para Fernão Dias até 2030.	124
Tabela E.1 – Dados de entrada para fluxo de caixa descontado SV1 base.	128
Tabela E.2 – Fluxo de caixa descontado SV1 Base.	129

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACEA	Associação dos Fabricantes Europeus de Automóveis
ACIM	Motor de Indução CA
AFV	Veículo a Combustível Alternativo
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANFAVEA	Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
BEV	Veículo Elétrico a Bateria
BLDC	Motor de Corrente Contínua sem Escovas
BTMS	<i>Battery Thermal Management System</i>
CA	Corrente Alternada
CAPEX	Custo Inicial do Capital
CC	Corrente Contínua
CI	Combustão Interna
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
DoD	Profundidade de Descarga
EMS	Sistema de Gerenciamento de Energia
EMSCS	Estratégia de Controle do Sistema de Gerenciamento de Energia
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ERVE	Estação de Recarga de Veículos Elétricos
FCEV	Veículo Elétrico a Célula de Combustível
FCHEV	Veículo Híbrido a Célula de Combustível
FV	Fotovoltaica
GDFV	Geração Distribuída Fotovoltaica
GEE	Gases de Efeito Estufa
HAAC	Acumulador Hidráulico
HEV	Veículo Elétrico Híbrido
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICE	Motor de Combustão Interna
ICEV	Veículo a Combustão Interna

IEA	<i>International Energy Agency</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
IPI	Imposto de Produto Industrializado
IPMM	Motor de Imã Permanente Interno
LDV	<i>Light-Duty Vehicle</i> (veículo comercial leve)
MCLP	Problema de Localização de Máxima Cobertura
MP	Material Particular Suspenso
MPC	Conversor Multiportas
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
NO _x	Óxido de Nitrogênio
NMHC	Hidrocarbonetos Não Metano
O&M	Operação e Manutenção
OCV	Tensão de Circuito Aberto
OPEX	Despesas Operacionais
PEV	Veículo Elétrico Puro
PHEV	Veículo Elétrico Híbrido Plug in
PIB	Produto Interno Bruto
PMSM	Motor Síncrono de Imãs Permanentes
PMSRM	Motor de Relutância Comutada
SCC	Custo Social do Carbono
SCEE	Sistema de Compensação de Energia Elétrica
SFV	Sistema Fotovoltaico
SIN	Sistema Interligado Nacional
SoC	Estado de Carga
TIR	Taxa Interna de Retorno
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
TSR	Taxa de Sucesso de Viagens
UFV	Usina Fotovoltaica
V2G	<i>Vehicle to grid</i>
VE	Veículo Elétrico
χ_p	Número de ERVEs

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Justificativa	19
1.2. Objetivo geral	20
1.3. Objetivos específicos	21
1.4. Estrutura da dissertação.....	21
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1. Veículos elétricos	23
2.1.1. Breve história dos veículos elétricos.....	27
2.1.2. Tipos de veículos elétricos	29
2.1.3. Tecnologias-chave dos veículos elétricos	36
2.1.4. Mercado de veículos elétricos	45
2.2. Recarga de veículos elétricos.....	49
2.2.1. Modos de recarga condutiva	51
2.2.2. Tipos de conectores	56
2.3. Modelos de alocação para estações de recarga para veículos elétricos	61
2.4. Serviço de recarga para veículos elétricos no Brasil e no mundo.....	64
2.5. Arquitetura de recarga de veículos elétricos a partir de energia solar	67
2.5.1. Arquitetura 1	70
2.5.2. Arquitetura 2	70
2.5.3. Arquitetura 3	71
2.5.4. Arquitetura 4	72
3. METODOLOGIA	74
3.1. Tráfego diário de veículos elétricos na rodovia Fernão Dias	77
3.2. Alocação de estações de recarga	82
3.3. Usinas fotovoltaicas para abastecimento das estações de recarga.....	87
3.4. Emissões de gases de efeito estufa.....	92
3.5. Custo da recarga dos veículos elétricos na Fernão Dias	96
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	99
5. CONCLUSÃO	107
Anexo A - Frota projetada de VEs por cenário	122
Anexo B - Dados históricos de frota pedagiada Fernão Dias	123

Anexo C - Projeção de frota pedagiada Fernão Dias	124
Anexo D - Relatório de dimensionamento PV Syst™	125
Anexo E – Fluxo de caixa descontado	128

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

Muitos estudos sobre o clima e os recursos naturais feitos nas últimas décadas concluíram que o modelo energético atual, fortemente baseado no consumo de combustíveis fósseis, é insustentável a longo prazo. Dois motivos principais estão relacionados com esta conclusão: a mudança climática induzida pela massiva queima destes combustíveis e o fim da disponibilidade dos recursos fósseis (PABLO; LÓPEZ; BRET, 2016).

A queima de combustíveis fósseis ocasiona a liberação de Gases de Efeito Estufa (GEE) na atmosfera. Diversos estudos apontam que o aumento da concentração de GEE na atmosfera está diretamente ligado à temperatura média global, através do fenômeno chamado Efeito Estufa. Embora este seja um fenômeno natural, necessário para a conservação da vida, a forte industrialização que marca o período após a Revolução Industrial, assim como o desmatamento e certos métodos de cultivo do solo resultaram em um aumento excessivo na concentração destes gases, que tem provocado um aquecimento global e consequentes mudanças climáticas (NAÇÕES UNIDAS BRASIL, 2020).

As emissões de CO₂ tem crescido constantemente ao longo dos anos, conforme aponta o relatório Key World Energy Statistics da International Energy Agency (IEA) (2019a). De 1971 para 2017, houve um aumento de aproximadamente 112%, saindo de 15.460 Mt de CO₂ emitidas em 1971 para 32.840 Mt de CO₂ em 2017. Segundo Stocker *et al.* (2013), os efeitos deste aumento podem ser percebidos na elevação do nível dos mares e oceanos, redução das quantidades de neve e gelo, mudanças nos ecossistemas e desertificação de grandes áreas.

Embora a queima de combustíveis fósseis seja ambientalmente prejudicial e limitada por ser não renovável, o mundo ainda é muito dependente deste recurso energético. Segundo dados da IEA (2019a), em 2017, o mundo consumiu energia equivalente a 9.717 Mtep, sendo 67,0% deste total proveniente de combustíveis de origem fóssil. No mesmo ano, foram gerados 25.606 TWh de eletricidade no mundo, onde 64,8% deste total foi produzido a partir de fontes fósseis, como o carvão mineral, petróleo e derivados e gás natural.

O Brasil ocupa uma posição privilegiada neste contexto. Em 2018, a matriz energética brasileira possuía 45,3% de participação de fontes renováveis, enquanto em 2016 o mundo apresentava apenas 13,7%. Além disto, a participação das fontes renováveis na matriz elétrica

em 2018 foi de 83,3%, colocando o Brasil na terceira posição no ranking mundial, atrás apenas da China e dos Estados Unidos (EPE, 2019a).

O setor de transportes é o principal consumidor de petróleo e derivados no mundo. Em 2017, somente o transporte rodoviário foi responsável pelo consumo de 49,2% de todo o petróleo consumido mundialmente (IEA, 2019a). Ele também é o principal responsável pela poluição do ar nas cidades e um dos maiores emissores de GEE. Segundo a European Commission (2016a), no continente europeu o setor de transportes é responsável por praticamente 25% das emissões de GEE e somente o transporte rodoviário foi responsável por mais de 70% de todas as emissões de GEE do setor de transportes em 2014. Nos Estados Unidos os números não são muito diferentes, onde o setor de transportes foi responsável por 28,3% do total de emissões de CO₂ em 2018 (EPA, 2020a). Já no Brasil a situação do setor de transportes é ainda mais agravante. Segundo a EPE (2019a), foram emitidas 192,7 Mt CO₂ em 2018, totalizando 46,3% de todas as emissões de CO₂ no mesmo período. Além disto, o setor foi responsável por 32,7% do consumo de energia no país, ocupando a posição de maior consumidor.

Por este motivo, políticas públicas têm sido implementadas em todo mundo com o objetivo de aumentar a eficiência dos meios de transportes e reduzir as emissões de GEE e outros poluentes, além de reduzir a dependência do consumo de petróleo e derivados (ARROYO *et al.*, 2008; EPA, 2020b; EUROPEAN COMMISSION, 2016b). Uma das alternativas escolhidas para a atingir este objetivo é a adoção em massa dos veículos elétricos (VEs). A eletrificação dos veículos permite o aumento da qualidade do ar, já que elimina as emissões locais, além de possibilitar a diversificação das fontes de energia primária, visto que eletricidade pode ser gerada a partir de várias fontes de energia que não necessariamente de origem fóssil. Ela ainda permite o uso de tecnologias que aumentam a eficiência energética dos veículos, como freios regenerativos e motores de alto rendimento. Além disto, a promoção da mobilidade elétrica em locais onde a geração de eletricidade é realizada com baixos níveis de emissão de GEE, através de fontes renováveis, pode contribuir significativamente para uma redução geral no consumo de energia primária e nas emissões globais de GEE (RIBAU *et al.*, 2012).

O governo brasileiro estabeleceu em 2018 o programa federal denominado Rota 2030, com o objetivo de aumentar o nível de desenvolvimento de seu setor automotivo. O programa tem como pressupostos a ampliação da inserção global da indústria automotiva brasileira sob os princípios da sustentabilidade ambiental e da cidadania, visando a redução dos custos e a diferenciação tecnológica (MINISTÉRIO DA ECONOMIA, 2019). Embora não seja um

programa de incentivos específico para o desenvolvimento de VEs, este trouxe incentivos para o setor de mobilidade elétrica como a redução do Imposto de Produto Industrializado (IPI) para veículos híbridos e puramente elétricos (ABVE, 2018a).

A frota brasileira de VEs está ainda em seu estágio inicial. Os primeiros VEs foram registrados no Brasil no ano de 2006 e, até o final de 2018, haviam sido licenciados no Brasil 10.889 VEs. Embora sua participação no mercado automobilístico seja pequena, o número de veículos licenciados tem crescido, em média, 64% ao ano, nos últimos cinco anos. O país reúne boas condições para o desenvolvimento de uma frota eletrificada expressiva, contando com uma indústria automobilística bem desenvolvida, contando em 2018 com 26 fabricantes, 67 unidades industriais, mais de 5.200 concessionárias e capacidade produtiva instalada para 5,05 milhões de veículos por ano (ANFAVEA, 2019). Apesar disto, apenas alguns modelos comerciais de VEs estão disponíveis no Brasil, com custos de aquisição muito elevados para os padrões de consumo brasileiro devido aos custos de importação e impostos, tornando os VEs, até o momento, inacessíveis para a maioria da população (ANGELO, 2019).

De acordo com Zhang *et al.* (2014), que avaliaram as políticas de incentivo à adoção dos VEs em diferentes países e analisaram quais foram seus impactos no aumento da participação de mercado, os incentivos à adoção dos VEs podem ser classificados como financeiros, suporte à tecnologia e suporte a infraestrutura de recarga. Os incentivos financeiros estão relacionados aos consumidores e aos fabricantes e envolvem créditos, reduções e isenções tributárias ou subsídio direto, além de isenção de impostos rodoviários, tarifas mais baratas de eletricidade e disponibilização de vagas de estacionamento gratuitas. Os incentivos relacionados ao suporte à tecnologia envolvem o investimento direto em Pesquisa & Desenvolvimento para o progresso tecnológico e redução dos custos de produção e escala dos VEs. Por fim, os investimentos em infraestrutura de recarga são assumidos como os mais fortemente relacionados a adoção dos VEs e podem ser suportados de modos diferentes, basicamente sob a ótica dos investidores e gestores ou dos fornecedores, sendo os primeiros responsáveis pelo investimento, construção, operação e gestão das estações de recarga e os últimos responsáveis pela geração, distribuição e armazenamento da eletricidade.

A integração entre os VEs e os sistemas de geração solares fotovoltaicos tem sido alvo de diferentes estudos nos últimos anos, como forma de aumentar a participação das fontes de energia renováveis no setor de transportes e consequente redução da emissão de GEE. Ye *et al.* (2015) apresentaram um modelo para Estações de Recarga de Veículos Elétricos (ERVEs) alimentadas por energia solar fotovoltaica e o aplicaram a um estudo de caso para a cidade de Shenzhen, onde obtiveram viabilidade econômica, baixos custos de recarga e redução de 99,7

a 100% nas emissões de poluentes. A eletromobilidade também oferece uma solução para o excesso de energia produzido durante o dia pelas usinas fotovoltaicas (UFVs), como apontado por Nunes, Farias e Brito (2015), em um estudo de caso baseado em cenários para Portugal em 2050. O estudo indicou que as metas de redução de emissões de CO₂ podem ser atingidas através da integração entre UFVs e VEs, reforçando a necessidade de infraestrutura de recargas diurnas, próximas às fábricas e locais de trabalho.

O Brasil também apresenta boas condições para uma maior integração entre a energia solar fotovoltaica e a eletromobilidade. O país tem experimentado um rápido crescimento em sua capacidade de geração de eletricidade a partir de sistemas fotovoltaicos nos últimos anos devido a modernização de sua legislação e criação do Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE), tendo ultrapassado a marca de 262 mil usinas instaladas e 3,0 GW de potência instalada (ANEEL, 2020). Além disto, o Brasil possui grande disponibilidade de irradiação solar que pode ser transformada em eletricidade através de tecnologia fotovoltaica, com potencial de até 1.800 kWh/kWp.ano, como apontado em Pereira *et al.* (2017), superando países em que este tipo de tecnologia encontra-se em estágios mais avançados de penetração no mercado, como a Alemanha.

1.1. Justificativa

O desenvolvimento de infraestrutura dedicada à recarga dos VEs é crucial para sua popularização. Dentro deste contexto, para que os VEs possam realizar viagens de longa distância, é fundamental que as principais rodovias possuam uma infraestrutura de recarga adequada. Os grandes mercados de VEs, como China, União Europeia e Estados Unidos têm estabelecido metas arrojadas de instalação de ERVEs ao longo das rodovias, em intervalos relativamente reduzidos. Além disto, diversas empresas privadas estão engajadas em desenvolver soluções para ERVEs rápidas em rodovias, sejam empresas dos setores de óleo e utilidades, consórcios de autopeças e muitos dos fabricantes de VEs (IEA, 2018).

De acordo com Liu *et al.* (2018), muitos estudos têm sido realizados nos últimos anos sobre a questão da alocação de ERVEs sob diferentes pontos de vista, levando em consideração os diferentes fatores envolvidos. Sob a perspectiva de planejamento, as ERVEs deveriam ser planejadas e construídas de forma harmoniosa com o planejamento da rede de distribuição

elétrica e com fácil acesso a fontes renováveis, levando em consideração os requisitos e restrições do sistema elétrico ao qual serão conectadas.

Algumas iniciativas têm surgido no Brasil com o objetivo de eletrificar as rodovias brasileiras, de forma a permitir que se realizem viagens de longa distância com os VEs, como divulgado em Albuquerque (2019) e Abve (2018b). No entanto, não se tem evidências sobre a adoção de uma metodologia científica para a alocação das ERVEs, ou mesmo de um planejamento abrangente que leve em consideração fatores importantes e aplicáveis para toda a malha rodoviária nacional, como disponibilidade de rede elétrica, estimativas de fluxo de VEs, autonomia dos VEs, entre outros.

Também não existem estudos conhecidos para a eletrificação da rodovia Fernão Dias até o momento, embora esta seja uma das principais rodovias do país, recebendo cerca de 25 mil veículos por dia e atendendo aproximadamente 16,6 milhões de habitantes (ARTERIS S/A, 2020). Em consulta realizada foi possível identificar que a rodovia Fernão Dias possuía apenas 2 ERVEs, sendo uma localizada na cidade de Mairiporã, no sentido sul e outra localizada na cidade de Extrema, no sentido norte. Ambas estão equipadas com um conector Tipo 2, de 22 kW e atendem a um único veículo por vez (CHARGEMAP, 2020; INCHARGE APP, 2020; OPEN CHARGE MAP, 2020; PLUGSHARE, 2020).

Desta forma, optou-se pela abordagem por construção de cenários para simular os impactos da eletrificação da rodovia Fernão Dias através de um modelo de alocação de ERVEs, alimentadas por UFVs conectadas à rede de distribuição elétrica através do SCEE. Vale salientar que, até o presente momento, desconhecem-se na literatura nacional estudos deste tipo realizados para as rodovias brasileiras. Foram feitas análises técnicas, ambientais e financeiras de forma a oferecer um conjunto de dados que sirva para a tomada de decisões em planejamentos a respeito de políticas de eletrificação de rodovias ou elaboração de novos modelos de negócio baseados na prestação de serviços de recarga de VEs em rodovias. Este trabalho busca contribuir na discussão deste tema, trazendo conclusões importantes para a literatura e demais envolvidos no processo.

1.2. Objetivo geral

O objetivo geral deste estudo é mensurar os impactos no consumo de eletricidade e nas emissões de GEE através da alocação de ERVEs na rodovia Fernão Dias a partir do uso de

energia fotovoltaica, além de analisar o custo hipotético cobrado pelo serviço de recarga de VEs que trafegam pela rodovia.

1.3. Objetivos específicos

De acordo com o objetivo geral definido para este trabalho, pretende-se alcançar os seguintes objetivos específicos:

- Estimar o fluxo de VEs na rodovia Fernão Dias para o ano de 2030, com base em um modelo de previsão de demanda e nos fluxos de veículos pedagiados atuais, através da elaboração de três cenários com diferentes níveis de penetração dos VEs no mercado brasileiro;
- Quantificar os custos evitados com a redução das emissões de CO₂ pelo uso dos VEs e das UFVs para alimentação das ERVEs na Fernão Dias;
- Comparar o custo do quilômetro rodado com VEs recarregados nas ERVEs modeladas neste estudo com os custos do quilômetro rodado para veículos convencionais a combustão interna e diferentes tipos de combustíveis disponíveis no mercado brasileiro;
- Difundir o uso da Geração Distribuída Fotovoltaica (GDFV) para a aplicação em ERVEs.

1.4. Estrutura da dissertação

O presente trabalho está dividido em cinco partes. O primeiro capítulo apresenta a introdução ao tema, demonstrando a importância da adoção dos VEs como uma alternativa para a substituição do uso de combustíveis fósseis no setor de transportes, qual é a situação brasileira dentro deste contexto, como a infraestrutura de recarga é um fator importante para sua adoção em massa e os principais benefícios da integração entre VEs e UFVs.

O segundo capítulo explora a fundamentação teórica para o desenvolvimento deste trabalho, onde são abordados temas relacionados aos VEs e sua recarga, como: histórico, tipos de VEs, configurações e sistemas, participação no mercado automobilístico nacional e internacional, modos de recarga e tipos de conectores, modelos de alocação de ERVEs, a

situação dos serviços de recarga públicas no Brasil e no mundo e as arquiteturas de integração entre os VEs e as UFVs.

Já no terceiro capítulo é apresentada a metodologia adotada para o desenvolvimento do estudo de caso sobre a rodovia Fernão Dias, contendo todos os procedimentos metodológicos adotados para o dimensionamento e alocação das ERVEs e UFVs, assim como para a análise dos impactos nas emissões de GEE e nos custos de recarga, para os cenários elaborados.

O quarto capítulo apresenta os resultados encontrados para cada cenário analisado com relação ao consumo de eletricidade, emissões de GEE e custos de recarga, apresentando adicionalmente as discussões cabíveis a cada um destes pontos.

Por fim, o capítulo 5 apresenta as principais conclusões deste trabalho e aponta sugestões para trabalhos futuros dentro do contexto apresentado.

CAPÍTULO 2

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Veículos elétricos

Veículo elétrico é um veículo terrestre impulsionado por um motor elétrico, que pode incluir diferentes categorias, de acordo com seu sistema de propulsão e forma de armazenamento de energia, como os Veículos Elétricos a Bateria (BEV), os Veículos Elétricos Híbridos (HEV) e os Veículos Elétricos a Célula de Combustível (FCEV) (CHAN; WONG, 2004).

Embora tenham surgido em meados do século XIX, na mesma época em que foi criada a bateria de chumbo ácido, nos últimos anos os VEs ganharam destaque como uma alternativa frente aos impactos ambientais e à crise energética causados de forma significativa pelo uso dos veículos a combustão interna (ICEVs). Neste sentido, a tecnologia dos HEVs foi desenvolvida com o objetivo de prover um aumento na economia de combustíveis e redução das emissões de GEE, embora não sejam capazes de resolver completamente a questão das emissões, sendo, portanto, um passo intermediário no desenvolvimento dos ICEVs para os Veículos Elétricos Puros (PEVs) (LI; KHAJEPOUR; SONG, 2019; NOVAIS, 2016).

Pablo, López e Bret (2016) elencaram os principais prós e contras dos VEs quando comparados aos ICEVs. Dentre as principais vantagens, destacam-se:

- Uma partida rápida e silenciosa, visto que os motores elétricos fornecem máxima potência desde seu *start*.
- Ausência da caixa de câmbio, que garante uma potência de entrega suave e direção mais fácil.
- Carros mais simples, com menos componentes do que os carros convencionais, requerendo menos manutenção.
- Sem considerar a geração de eletricidade, as emissões de gases de escape desaparecem. Isto reduz a poluição urbana do ar comparado aos convencionais ICEVs, com alguns benefícios de saúde pública associados.

- Os freios regenerativos tornam possível a exploração da energia cinética quando os veículos desaceleram.
- Melhoria na resposta rápida em velocidades baixas e melhor resposta na aceleração.

Já as principais desvantagens são:

- Autonomia menor do que os veículos convencionais a combustão, levando a recargas mais frequentes.
- Menor velocidade máxima do que os veículos convencionais de categorias comparáveis.
- Alto custo da bateria, o que eleva o preço final dos veículos.
- Tempos de recarga na ordem de 8 a 10 horas para veículos recarregados nas residências, dependendo do carro e do país em que se encontra (visto que voltagens menores demandam maior tempo de recarga).
- Acesso limitado aos pontos de recarga quando fora das residências, devido à escassez de ERVEs disponíveis atualmente.
- O veículo em si não emite GEE, mas quando se leva em conta a geração de eletricidade extra, as emissões podem ser inclusive maiores do que os veículos convencionais.

Segundo Novais (2016), os VEs são, no mínimo, duas vezes mais eficientes do que os ICEVs quando são comparados em uma análise *Well to Wheel*. Isto significa que, com a mesma quantidade de energia (e conseqüente mesmo recurso financeiro), um VE pode se deslocar por mais que o dobro da distância do que um ICEV. A Figura 2.1 exemplifica uma análise *Well to Wheel* comparativa entre um VE e um ICEV convencional movido a diesel, onde pode ser percebida claramente a diferença entre os respectivos rendimentos.

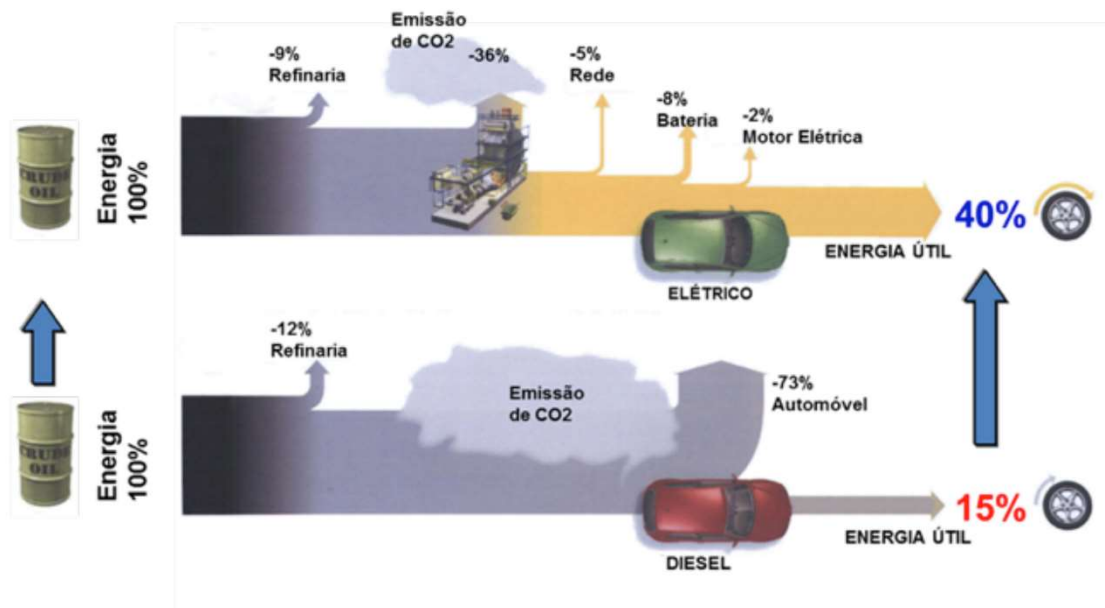


Figura 2.1 – Análise *Well to Wheel* de eficiência: veículo a Diesel vs veículo elétrico.
Fonte: Novais (2016)

A análise *Well to Wheel* também pode ser utilizada para avaliar o potencial de emissões evitadas de GEE com a frota de VEs. De acordo com o relatório *Global EV Outlook 2019* da IEA (2019b), as emissões evitadas de GEE provenientes da frota de veículos comerciais leves (LDVs) podem chegar a 535,6 Mt CO₂ equivalente em 2030 para o cenário EV30@30, sob um total projetado para o setor de transportes igual a 8,9 Gt de emissões de CO₂ equivalente. A Figura 2.2 demonstra as contribuições dos diferentes tipos de veículos e tecnologias para os cenários projetados.

Segundo Chan e Wong (2004), a filosofia de engenharia dos VEs baseia-se essencialmente na integração entre a engenharia automobilística e a engenharia elétrica. Portanto, os sistemas de integração e otimização são de suma importância para alcançar uma boa performance e menores custos. Além disto, os autores defendem que as abordagens de *design* dos modernos VEs devem incluir tecnologias da engenharia automobilística, engenharia elétrica e eletrônica e engenharia química, além de adotar *designs* únicos adequados para os VEs e técnicas especiais de manufatura.

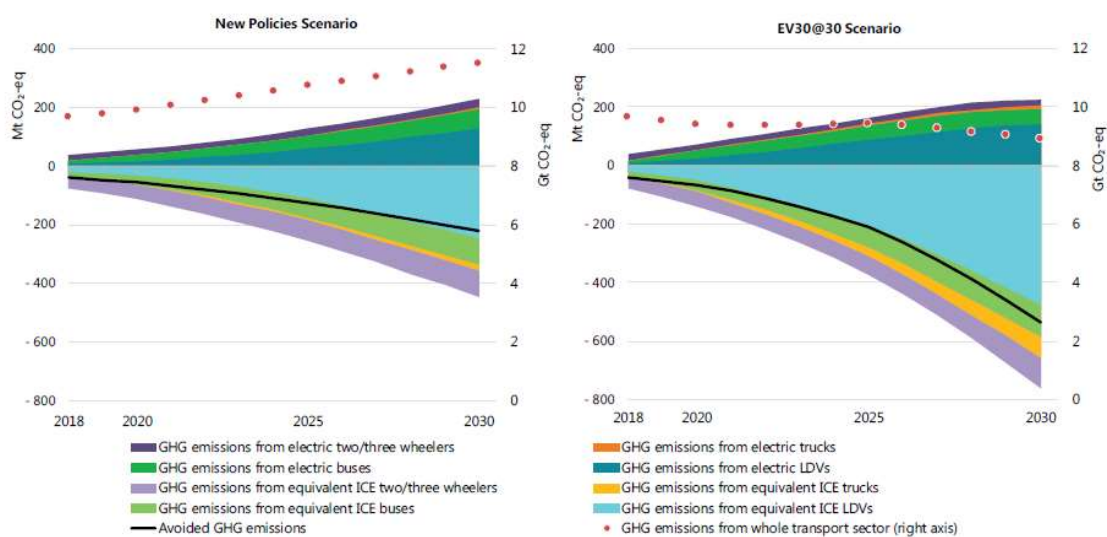


Figura 2.2 – Análise *Well to Wheel* para emissões líquidas e evitadas de GEE para frota de VEs por modo e emissões totais de GEE do setor de transportes.

Fonte: IEA (2019b)

Ainda de acordo com Chan e Wong (2004), Os VEs são compostos de três subsistemas principais, como pode ser observado na Figura 2.3, sendo a propulsão elétrica, fonte de energia e sistema auxiliar. O subsistema de propulsão elétrica é composto de um controlador eletrônico, conversor eletrônico, motor elétrico, transmissão mecânica e rodas. Já o subsistema de fonte de energia envolve a fonte de energia propriamente dita, a unidade de gerenciamento de energia e a unidade de reabastecimento de energia. Por fim, o subsistema auxiliar consiste na unidade de direção hidráulica, unidade de controle de temperatura e fonte auxiliar de energia.

Nos últimos cinco anos, os VEs têm ganhado notoriedade no mercado automobilístico internacional, batendo recordes de vendas em países como China, Estados Unidos e integrantes da União Europeia. Para um futuro próximo, esperam-se grandes mudanças no setor, onde os fabricantes de autopeças necessitarão adequar suas fábricas para produzirem componentes para VEs, postos de abastecimento de combustível precisarão migrar para postos mistos e novos modelos de negócios farão parte da cadeia automobilística. Para que isto aconteça, diversos fatores deverão ser considerados, como: custo dos VEs, disponibilidade de energia elétrica gerada a partir de fontes renováveis e limpas, aspectos relacionados à segurança dos veículos e outros aspectos econômicos (FREITAS, 2012; IEA, 2019b; VONBUN, 2015).

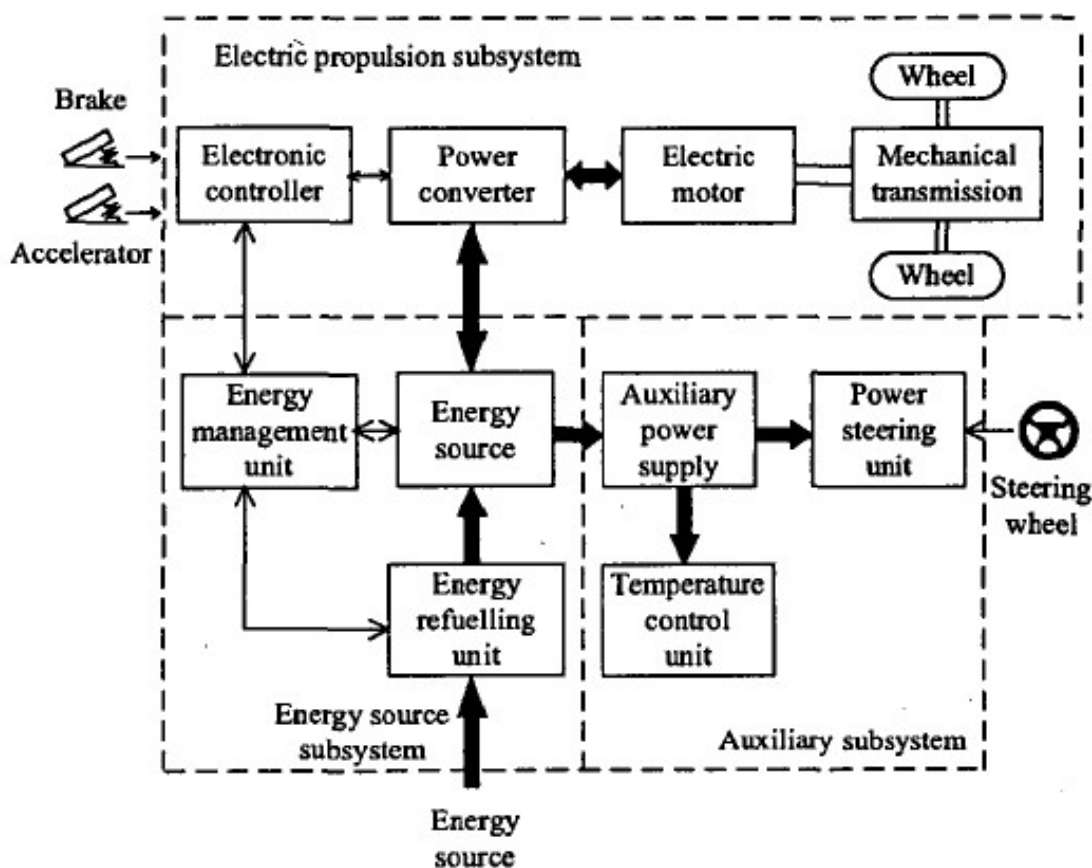


Figura 2.3 – Composição dos VEs.
Fonte: Chan e Wong (2004)

2.1.1. Breve história dos veículos elétricos

Muitos acreditam que os VEs são uma invenção dos tempos modernos, mas na verdade eles já existem há mais de um século, embora tenham caído no esquecimento durante décadas. Por mais que seja difícil afirmar com exatidão quem foi seu inventor ou em qual país ele foi criado, uma série de avanços, desde a bateria ao motor elétrico, ainda nos anos de 1800, levaram o primeiro VE para as ruas (MATULKA, 2014).

Segundo Matulka (2014), entre 1828 a 1835, inovações na Hungria, Holanda e nos Estados Unidos criaram alguns dos primeiros carros elétricos de pequena escala. Por volta de 1832, Robert Anderson desenvolveu o primeiro VE rudimentar, mas somente na década de 1870 é que os VEs se tornaram práticos e ganharam as ruas. A Figura 2.4 retrata um VE construído por um inventor inglês em 1884.



Figura 2.4 – Veículo elétrico desenvolvido em 1884.
Fonte: Matulka (2014)

O primeiro carro a combustão interna só surgiu em 1886, desenvolvido pelo alemão Karl Benz. Embora fossem uma promessa, os primeiros ICEVs apresentavam diversos problemas, exigindo muito esforço manual para dirigi-los e necessitavam ser iniciados com o uso de uma manivela, o que dificultava a operação. Também eram barulhentos e seus escapamentos eram desagradáveis (MATULKA, 2014; NOVAIS, 2016).

Em 1903, a frota de veículos em Nova York era composta por 53% de veículos movidos a vapor, 27% a combustão e 20% movidos com motor elétrico. Por não precisarem do uso da alavanca de partida, serem de fácil direção, além de silenciosos e não emitirem fumaça pelo escapamento, os VEs rapidamente se tornaram populares entre os moradores urbanos, sendo os mais preferidos pelas mulheres (MATULKA, 2014; NOVAIS, 2016)

A dificuldade de abastecimento dos VEs, devido a precária infraestrutura de distribuição elétrica, somada a abundância do petróleo, a construção de melhores rodovias, que incentivaram a percursos mais longos, e a superação dos principais problemas dos primeiros ICEVs, como a eliminação da manivela através da invenção do motor de partida, colocou fim ao mercado dos VEs a partir de 1912. Em 1935, eles praticamente já haviam desaparecido (MATULKA, 2014; NOVAIS, 2016).

A virada para os VEs veio na década de 1970, com a disparada dos preços do petróleo devido ao embargo petrolífero proclamado pela Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP) direcionado às nações apoiadoras de Israel durante a Guerra de Yom Kippur, também conhecida como Guerra Árabe-Israelense de 1973. Novais (2016) afirma que, devido aos incentivos governamentais nos países desenvolvidos para promover combustíveis alternativos, os VEs ressurgiram com uma eletrônica bem desenvolvida e vários tipos de baterias. Começou então um complexo jogo de interesses entre os VEs e a indústria petrolífera, com a segunda vencendo a batalha comercial e tirando os VEs de cena mais uma vez, por volta de 1979.

A preocupação com as mudanças climáticas e a finitude dos recursos naturais fósseis, além dos crescentes avanços na eletrônica, nos microprocessadores, na conectividade e na tecnologia das baterias, gerou condições para uma nova onda de adesão aos VEs, fortemente impulsionada pela *startup* Tesla Motors, que anunciou em 2006 a produção de VEs esportivos luxuosos, com autonomia de mais de 300 quilômetros (MATULKA, 2014; NOVAIS, 2016).

Após o sucesso obtido pela Tesla, atingindo em um valor de mercado de 209,47 bilhões de dólares e o posto de fabricante de veículos mais valioso da história (BELLON, 2020), as outras montadoras entraram na corrida dos VEs, desenvolvendo diversos modelos híbridos e totalmente elétricos, sendo alguns deles já comercializados no Brasil, como o Nissan Leaf, o Renault Zoe, o BMW i3, entre outros.

2.1.2. Tipos de veículos elétricos

“Os Veículos de Combustível Alternativo (AFVs) são geralmente descritos como todos os tipos de veículos que podem ser abastecidos total ou parcialmente com combustíveis alternativos, como os biocombustíveis (etanol, biogás) e eletricidade.” (REZVANI; JANSSON; BODIN, 2015, p. 2). Por sua vez, os VEs se enquadram nesta categoria, podendo ser classificados em três grandes grupos, sendo estes os HEVs, BEVs e FCEVs.

Os HEVs possuem um motor a combustão interna (ICE) ao lado de um trem de força elétrico suplementar que consiste em um motor elétrico acionado por uma bateria. A bateria é recarregada através da energia desprendida durante as frenagens ou diretamente pelo ICE. Um Veículo Elétrico Híbrido Plug in (PHEV) é uma derivação dos HEV, que conta com uma bateria com maior capacidade e onde é possível realizar a recarga da bateria através de um conjunto de conector e cabo conectado a uma fonte de eletricidade externa, podendo se deslocar através do

motor elétrico ou do ICE. Já os BEVs possuem um trem de força totalmente elétrico alimentado por uma bateria de grande capacidade, recarregada a partir de uma rede elétrica externa. (REZVANI; JANSSON; BODIN, 2015). Por fim, os FCEVs possuem trem de força substancialmente elétrico, onde a eletricidade é fornecida por uma célula de combustível funcionando a hidrogênio, onde muitos combustíveis diferentes podem ser utilizados para alimentar a célula (PABLO; LÓPEZ; BRET, 2016). As principais características e desafios referentes aos BEVs, HEVs e FCEVs foram sumarizadas por Chan e Wong (2004), como pode ser observado no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Características dos BEVs, HEVs e FCEVs.

Tipo de VE	BEVs	HEVs	FCEVs
Propulsão	Motor elétrico	Motor elétrico Motor de combustão interna	Motor elétrico
Sistema de energia	Bateria Ultracapacitor	Bateria Ultracapacitor Unidade geradora ICE	Célula de combustível
Fonte de energia & infraestrutura	Estações de recarga elétrica	Postos de combustível Estações de recarga elétrica (opcionais)	Hidrogênio Metanol ou gasolina Etanol
Características	Zero emissões Independência do petróleo 100-200 km de autonomia Alto custo inicial Disponível comercialmente	Emissões muito baixas Alta autonomia Dependência do petróleo Complexidade Disponível comercialmente	Zero emissões ou emissões ultra baixas Alta eficiência energética Independência do petróleo Autonomia satisfatória Alto custo atual Em desenvolvimento
Principais desafios	Bateria e gerenciamento da bateria Alta performance do sistema de propulsão Estrutura de recarga	Gerenciamento de múltiplas fontes de energia Dependente do ciclo de condução Tamanho da bateria e gerenciamento	Custo, vida útil e operação da célula a combustível Processador de combustível Sistema de combustível

Fonte: Adaptado de Chan e Wong (2004).

2.1.2.1. Veículos híbridos

Em um HEV típico, um motor a combustão movido a gasolina (ou etanol) funciona em conjunto com um motor elétrico alimentado por um sistema de baterias. Um sistema de freios regenerativos é adotado nos modelos mais modernos de HEVs, como o Honda Civic Hybrid e o Toyota Camry Hybrid, que faz com que o veículo seja capaz de reaproveitar parte da energia

despendida durante a frenagem. Durante as frenagens, o motor elétrico atua como um gerador e a energia cinética é transferida para a bateria (ANGELINE; RAJKUMAR, 2020).

Os HEVs possuem mais componentes elétricos do que os ICEVs, como máquinas elétricas, sistemas de eletrônica de potência, transmissões eletrônicas continuamente variáveis, dispositivos avançados de armazenamento de energia e conversores. A configuração do trem de força de um HEV pode ser dividida em três tipos: série, paralela e combinada (ÇAĞATAY BAYINDIR; GÖZÜKÜÇÜK; TEKE, 2011).

Nos HEV em série, o motor elétrico é o principal propulsor do veículo e o ICE não tem conexão mecânica com as rodas. O ICE alimenta o motor elétrico e as baterias através de um gerador e, uma vez que as baterias estão recarregadas, o ICE é desligado. Uma quantidade significativa de energia é fornecida às baterias provinda da frenagem regenerativa e da condução em declive. Ultracapacitores são utilizados no sistema para aumentar a vida útil e a eficiência das baterias. Esta configuração é geralmente utilizada em veículos pesados, como ônibus e veículos militares (ANGELINE; RAJKUMAR, 2020; ÇAĞATAY BAYINDIR; GÖZÜKÜÇÜK; TEKE, 2011; EHSANI; GAO; MILLER, 2007).

A Figura 2.5 demonstra os principais componentes do HEV em série e seu fluxo de potência.

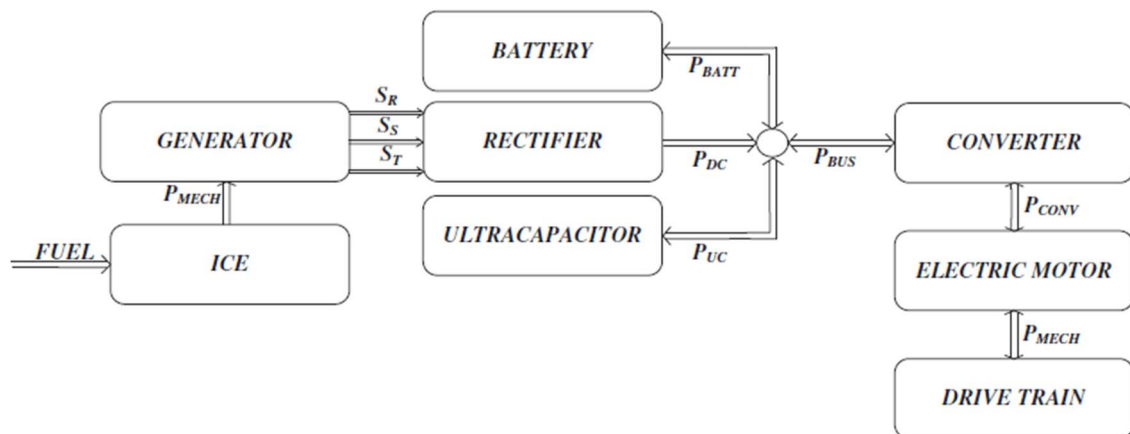


Figura 2.5 – Fluxo de potência do HEV em série.
Fonte: Çağatay Bayındır; Gözüküçük e Teke (2011)

Angeline e Rajkumar (2020) e Çağatay Bayındır; Gözüküçük e Teke (2011) afirmam que, nos HEV em paralelo, a força motriz das rodas é alimentada tanto pelo ICE quanto pelo motor elétrico, como mostrado na Figura 2.6. O trem de força do veículo é conectado ao motor elétrico e ao ICE através de um acoplamento mecânico e existem várias estratégias de controle usadas para a configuração paralela, sendo que, na mais comum, o ICE está basicamente sempre

ligado e opera a uma potência constante de saída em seu máximo ponto de eficiência. Quando a potência requerida pela transmissão é maior do que a potência de saída do ICE, o motor elétrico é ligado e fornece a potência adicional necessária. Se a potência requerida pela transmissão é menor do que a potência fornecida pelo ICE, a potência excedente é utilizada para recarregar o sistema de baterias.

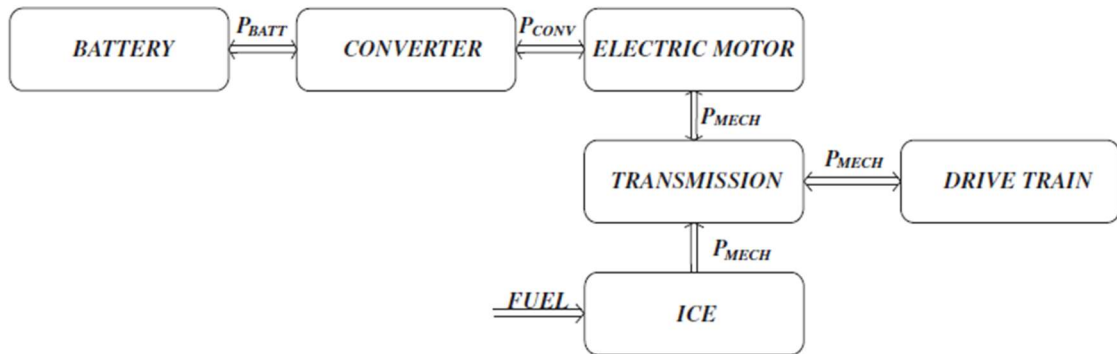


Figura 2.6 – Fluxo de potência do HEV em paralelo.
Fonte: Çağatay Bayindir; Gözüküçük e Teke (2011)

Ainda de acordo com Angeline e Rajkumar (2020) e Çağatay Bayindir; Gözüküçük e Teke (2011), os HEV podem ainda adotar uma configuração combinada, que mescla as características das configurações em série e paralela. Neste tipo de configuração, o alternador é acoplado ao ICE, que é responsável pela recarga da bateria. Em condições normais de operação, o ICE aciona tanto o trem de força quanto o gerador. Quando se atinge a aceleração total, potência é transferida da bateria para o motor elétrico e faz com que o veículo atinja a aceleração solicitada. Este tipo de configuração tem se tornado o padrão em veículos híbridos de passeio. A Figura 2.7 mostra o essencial desta arquitetura.

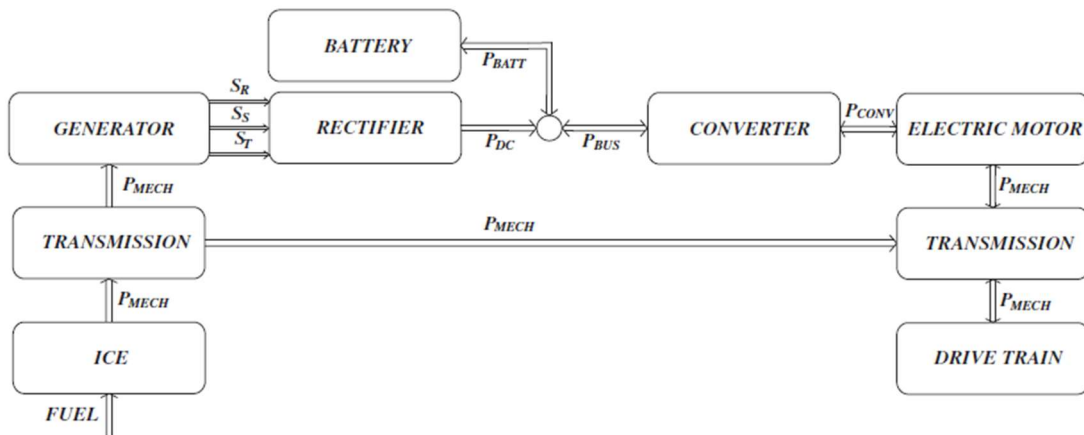


Figura 2.7 – Fluxo de potência do HEV série-paralelo.
 Fonte: Çağatay Bayindir; Gözüküçük e Teke (2011)

2.1.2.2. Veículos elétricos a bateria

Os BEVs são veículos que se deslocam com propulsão gerada por um motor elétrico alimentado por um sistema de baterias. Eles utilizam uma fonte de eletricidade externa para recarregar as baterias, além da energia reaproveitada através da frenagem regenerativa. Por este motivo, uma infraestrutura de recarga adequada é uma premissa para sua popularização (MAHMOUDZADEH ANDWARI *et al.*, 2017).

Os principais componentes de um BEV são as baterias, considerada o principal sistema de armazenamento de energia atual, o motor elétrico, que pode ser de diferentes tipos conforme os requisitos do veículo e os sistemas de controle e conversão de potência, responsáveis pelo acionamento do motor elétrico e sua compatibilidade com o sistema de armazenamento de energia (ANGELINE; RAJKUMAR, 2020). A Figura 2.8 demonstra os principais componentes de um BEV.

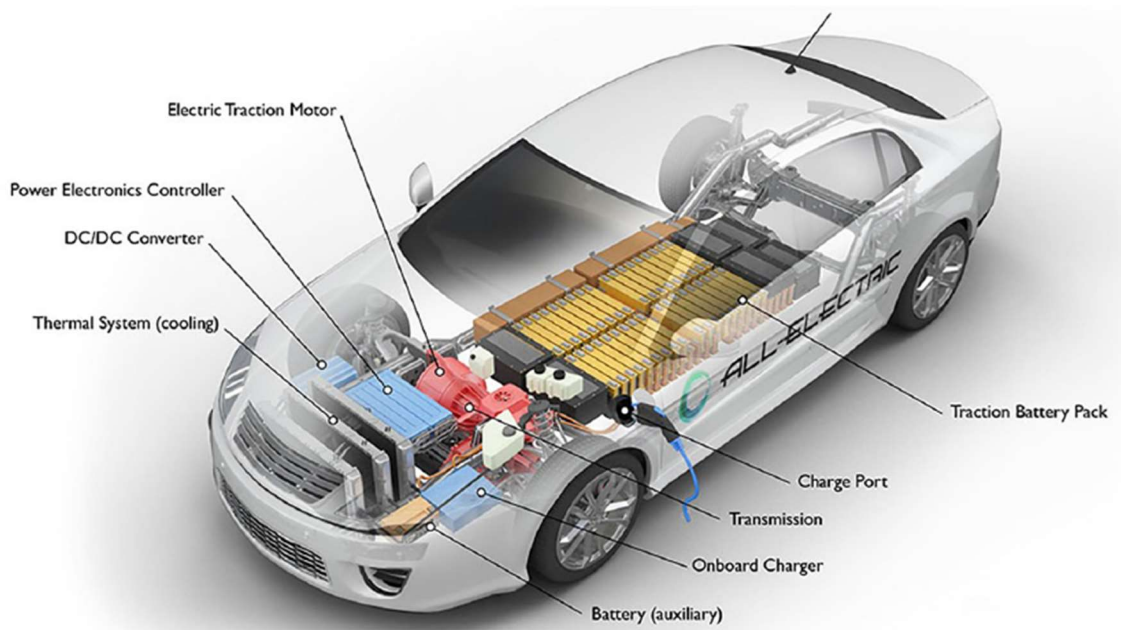


Figura 2.8 – Componentes de um BEV.
Fonte: Angeline e Rajkumar (2020)

Os BEVs têm ganhado a atenção dos fabricantes de veículos e dos consumidores durante os últimos anos devido aos sérios problemas ambientais e a crise energética resultante dos ICEVs. Eles possuem muitas vantagens, como alta eficiência, baixo nível de ruído, ausência de emissões atmosféricas liberadas pelo escapamento, possuem boa aceleração e podem ser recarregados durante a noite com eletricidade gerada a baixos custos em qualquer ERVE, incluindo aquelas alimentadas por energias renováveis. No entanto, os BEVs também enfrentam significantes desafios para sua maior penetração no mercado, como os altos custos do sistema de armazenamento de eletricidade, o elevado tempo de recarga, a necessidade de uma infraestrutura de recarga ampla e bem desenvolvida, que necessita de investimentos consideráveis, além do alto custo inicial para os consumidores e a baixa visibilidade dos baixos custos do quilômetro rodado (LI; KHAJEPOUR; SONG, 2019; MAHMOUDZADEH ANDWARI *et al.*, 2017). Apesar de todos estes desafios, a maioria dos governos tem planejado um papel importante para os BEVs e novos modelos de negócios têm sido desenvolvidos para lidar com algumas de suas desvantagens, assim como políticas têm sido implementadas para suportar sua evolução tecnológica. O resultado destas ações pode ser observado na queda de seu custo inicial e sua maior popularização nos últimos anos (WEISS *et al.*, 2012).

2.1.2.3. Veículos elétricos a célula de combustível

Similares aos BEVs, os FCEVs usam um trem de força totalmente elétrico, com a diferença que este é alimentado por uma pilha de células de combustível. O combustível utilizado nos FCEVs é o hidrogênio, que pode ser armazenado diretamente em um tanque de combustível montado no veículo ou extraído de outro combustível através de um processador (DAS; TAN; YATIM, 2017). Na Figura 2.9 é detalhada uma configuração típica de um trem de força de um FCEV com um processador de combustível.

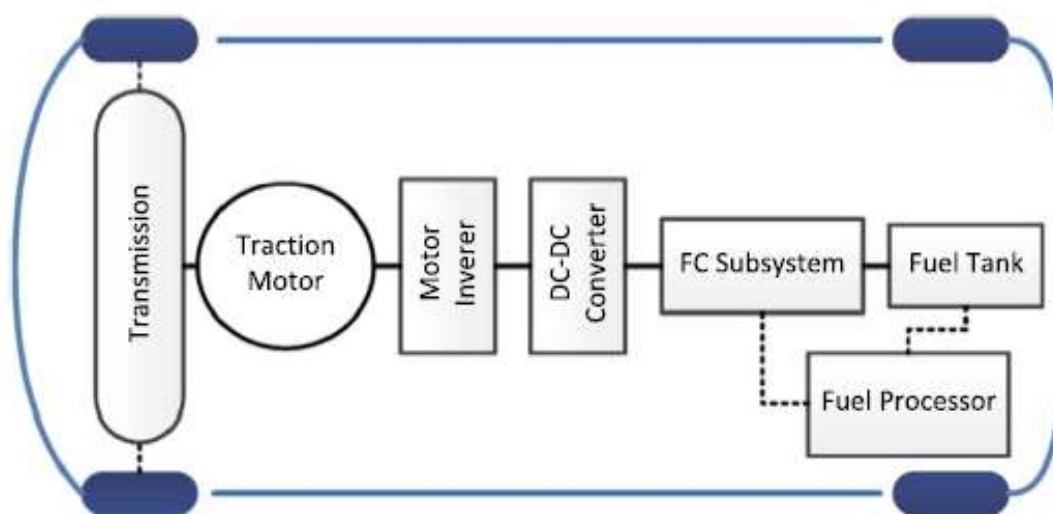


Figura 2.9 – Configuração de um trem de força de FCEV.
Fonte: Das, Tan e Yatin (2017)

A célula de combustível é um sistema que utiliza o hidrogênio para gerar eletricidade através de uma reação eletroquímica. O combustível e um gás oxidante entram na célula de combustível separadamente através dos eletrodos, causando uma reação química que gera uma tensão elétrica (PABLO; LÓPEZ; BRET, 2016). Os produtos resultantes desta reação são basicamente o calor liberado e a água, não existindo emissões de dióxido de carbono (CO_2) ou outros GEE, como óxidos de nitrogênio (NO_x) ou metano, nem poluentes do ar, como os hidrocarbonetos não metano (HCNM), monóxido de carbono (CO) ou material particulado suspenso (MP) (HARADA; MAKOTO, 2018).

Segundo Pablo, López e Bret (2016), existem dois tipos de FCEVs: os FCEVs simples, que utilizam apenas o hidrogênio para alimentar o veículo e os veículos híbridos a célula de combustível (FCHEV), que são alimentados por outros elementos além de combustível contendo hidrogênio, como por exemplo, baterias recarregadas a partir de conexão externa. Para ambos os tipos, os principais componentes são: processador de combustível, responsável pelo preparo do combustível contendo hidrogênio (como hidrogênio gasoso, metanol, etc.),

eliminando impurezas que podem prejudicar o funcionamento das células de combustível; a célula de combustível, responsável pela produção de eletricidade a partir do ar e do combustível e o motor elétrico, responsável pela propulsão do veículo, além de outros sistemas, como a unidade de controle eletrônica, as baterias e o tanque de combustível.

Embora já existam modelos comerciais disponíveis no mercado, os FCEVs encontram-se atualmente em estágio de pesquisa e desenvolvimento, lidando com grandes desafios com relação a produção, armazenamento e distribuição do hidrogênio, além dos altos custos envolvidos na aquisição e expansão da infraestrutura de recarga. Espera-se que estes custos decaiam nas próximas décadas, ao mesmo tempo em que os custos dos combustíveis fósseis tornem-se cada vez mais altos, possibilitando a expansão do *market share* dos FCEV, conforme cenário sugerido na Figura 2.10 para o mercado de veículos comerciais leves (VEZIROGLU; MACÁRIO, 2013).

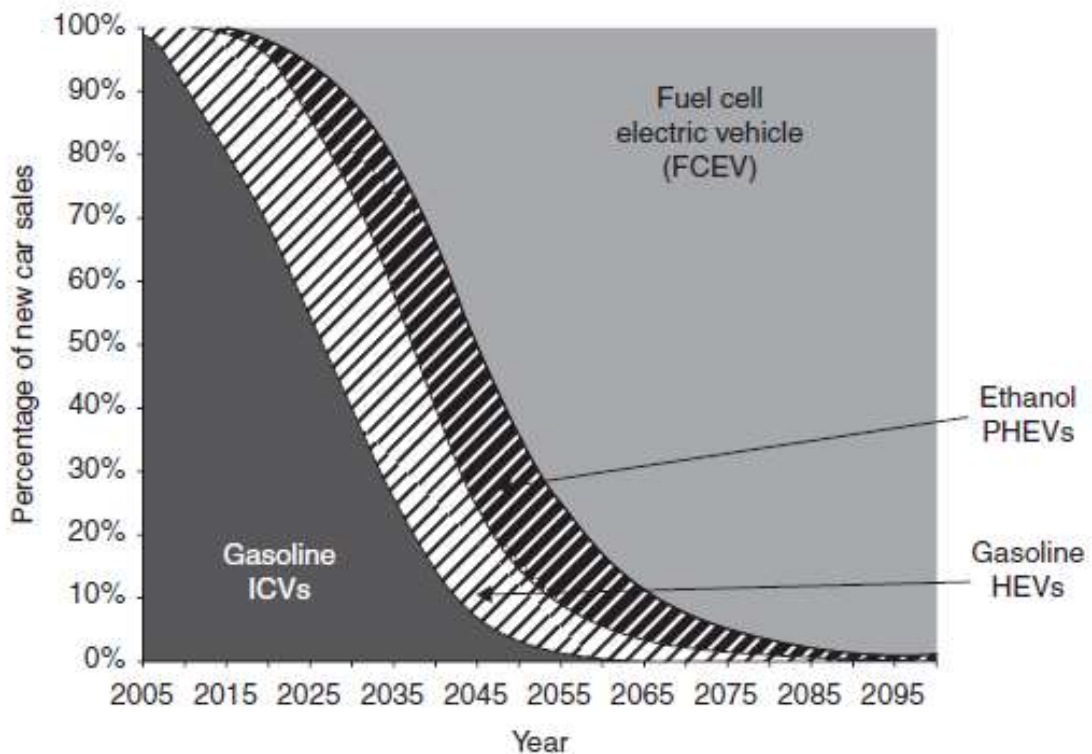


Figura 2.10 – Frações estimadas de vendas de veículos comerciais leves ao longo do tempo.
Fonte: Veziroglu e Macário (2013)

2.1.3. Tecnologias-chave dos veículos elétricos

Kumar e Revankar (2017) listaram as tecnologias chaves nos VEs, cuja integração de todas elas é necessária para seu sucesso: (a) tecnologia de acionamento do motor, (b) tecnologia de eletrônica de potência, (c) tecnologia de microeletrônica de controle, (d) tecnologia automotiva, (e) tecnologia de materiais e (f) tecnologia de armazenamento de energia. Dentre estes, os sistemas de acionamento do motor e geração e armazenamento de energia são os maiores diferenciais em um VE e serão abordados a seguir em um nível maior de detalhe.

O sistema de propulsão elétrica é o coração de um VE. Ele consiste no motor de acionamento, dispositivo de transmissão e rodas, sendo que, em muitos casos, o dispositivo de transmissão é opcional. De fato, o motor de acionamento, composto pelo motor elétrico, conversor de potência e controlador eletrônico, é o núcleo do sistema de propulsão de um VE (CHAN; WONG, 2004).

O sistema de propulsão elétrica pode conter um único motor de acionamento ou vários. Os principais requisitos para os motores de VEs são sua potência, características de torque versus velocidade, confiabilidade, alta eficiência em amplas faixas de velocidade e torque e seu custo benefício (KUMAR; REVANKAR, 2017). Podem ser utilizados motores de corrente contínua (CC) ou corrente alternada (CA), de acordo com os requisitos dos VEs. Os motores CA podem ser adaptados para as especificações dos motoristas e podem ser usados como geradores para a recarga das baterias, além de serem adaptáveis para terrenos irregulares e transmitirem maior aceleração. Já os motores CC são utilizados por serem facilmente instaláveis, possuírem boa disponibilidade e oferecerem bom torque mesmo com o veículo parado. Basicamente existem cinco tipos de motores que são mais utilizados pelos fabricantes de VEs: motor de corrente contínua sem escovas (BLDC), motor síncrono de ímãs permanentes (PMSM), motor de indução CA (ACIM), motor de ímã permanente interno (IPMM) e motor de relutância comutada (PMSRM) (ANGELINE; RAJKUMAR, 2020; FREITAS, 2012). A Figura 2.11 mostra uma classificação de motores elétricos para VEs.

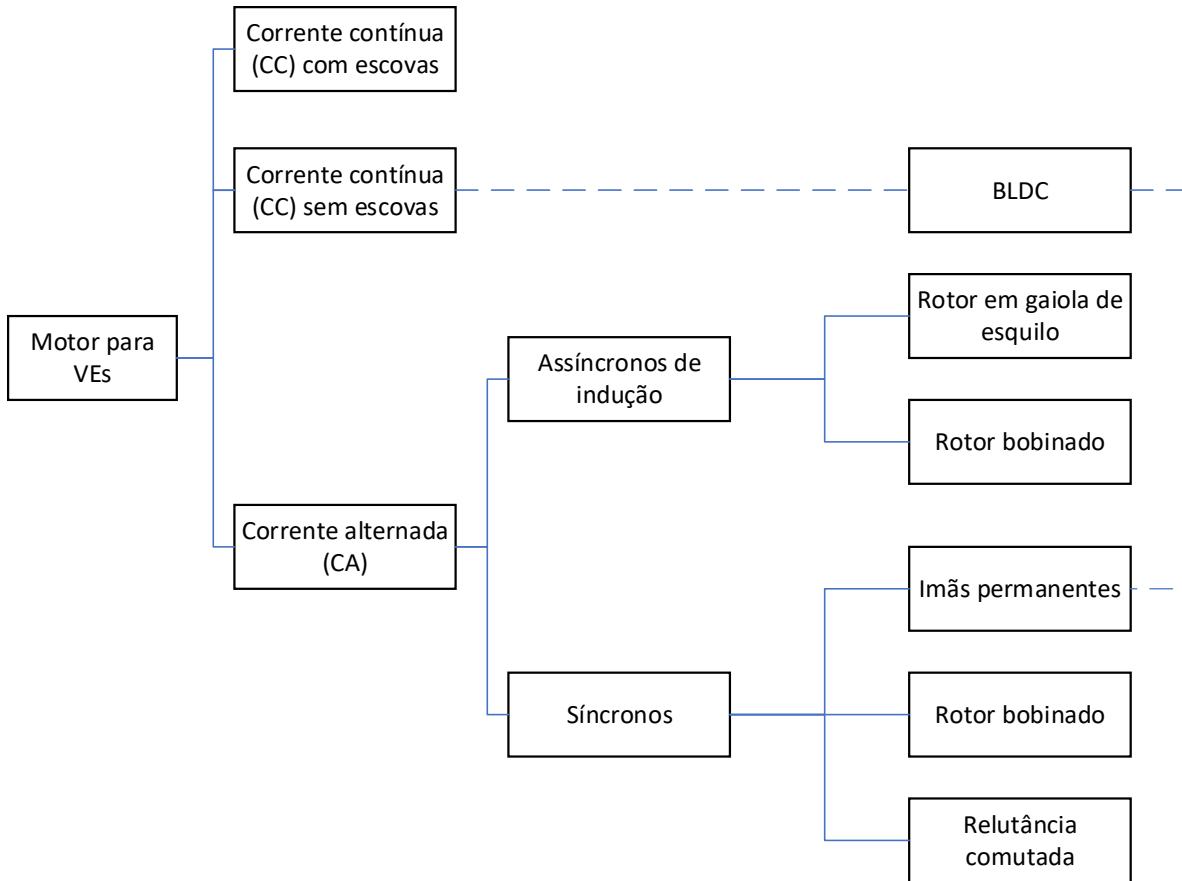


Figura 2.11 – Classificação de motores para VEs.
Fonte: Adaptado de Freitas (2012)

A aplicação dos motores em VEs tem particularidades em relação a aplicação geral de motores elétricos utilizados em indústrias. Kumar e Revankar (2017) afirmam que os motores para VEs devem ter alto torque para as partidas e para os trechos em aclave, alta densidade de potência para atingir altas acelerações e velocidades, capacidade de suportar carga por longos intervalos, além de ser eficiente e de custo acessível. Por fim, os motores elétricos de VEs diferem dos motores industriais nos quesitos de ciclagem de operação, seja ela nos modos liga e desliga ou aceleração e desaceleração. A escolha de qual motor utilizar em um VE é feita em função de suas características de velocidade e torque.

De acordo com Angeline e Rajkumar (2020), os motores BLDC apresentam menor necessidade de manutenção, possuem alta durabilidade, eficiência na ordem de 85 a 90% e são leves. Sua velocidade pode ser controlada com melhor eficiência quando comparado aos ACIMs. Estes motores têm sido usados em motocicletas elétricas e triciclos, como a TVS Creon, a Ather Energy, a Hero Electric e outras. Já os motores PMSM são adotados em motocicletas de alta performance, além de carros e ônibus elétricos. Modelos como o Chevy Bolt, Nissan Leaf e o Tata Ultra Urban empregam estes motores.

Ainda segundo Angeline e Rajkumar (2020), os motores de indução são predominantes nos VEs devido a sua robustez, sua resistência mecânica e alto rendimento, da ordem de 85% a 97%. Funcionam com velocidade constante quando alimentados com energia disponível e podem operar alimentados com energia CC proveniente de baterias, desde que trabalhem em conjunto com inversores de frequência. Motores deste tipo são utilizados nos modelos Tesla S, Tesla X, Toyota RAV4 e no GM EV1.

Vários sistemas energéticos podem ser utilizados para armazenar eletricidade (baterias, supercapacitores e magnetos supercondutores), gerar eletricidade (células de combustível, células fotovoltaicas, turbinas eólicas) e armazenar energia mecânica (*flywheels*, centrais hidrelétricas reversíveis e acumuladores hidráulicos). No entanto, alguns deles não são adequados para serem utilizados nos VEs devido aos seus requisitos de instalação e operação, nível tecnológico ou altos custos. Dentre os sistemas de armazenamento de eletricidade disponíveis comercialmente, as baterias são o dispositivo de armazenamento de energia elétrica mais difundido em aplicações em sistemas de potência (LI; KHAJEPOUR; SONG, 2019).

“Uma bateria é um dispositivo, composto por uma ou várias células unitárias, que convertem energia química em energia elétrica e vice-versa.” (FREITAS, 2012, p. 28). As principais especificações das baterias recarregáveis, amplamente utilizadas nos VEs, foram sumarizadas por Freitas (2012) e Torabi e Ahmadi (2019), conforme a seguir:

Autodescarga: taxa em que a bateria se descarrega ao longo do tempo, mesmo sem ter sido utilizada, expressa em % (geralmente para o período de um mês). A taxa de autodescarga pode aumentar com a elevação da temperatura, com o avanço da vida útil da bateria e na presença de umidade.

Energia específica: quantidade de energia que pode ser armazenada em uma bateria por massa, expressa em kWh/kg.

Densidade de energia: semelhante a energia específica, mas em relação ao volume ocupado pela bateria, expressa em kWh/l.

Capacidade da bateria (C): representa o valor teórico de corrente que a bateria é capaz de fornecer durante uma hora de funcionamento a 25 °C, expressa em Ah. Como exemplo, se uma bateria de capacidade de 50 Ah descarrega à taxa de 1C, teoricamente entrega 50A em uma hora.

Efeito memória: efeito que provoca a diminuição da capacidade de armazenamento de carga da bateria, conhecido como vício da bateria. Altera a percentagem de armazenamento da bateria, presente principalmente nas baterias de Níquel-Cádmio (Ni-Cd).

Estado de carga (SoC): percentual de carga que resta em uma bateria. Equivale a 100% em uma bateria completamente carregada e decresce conforme a bateria se descarrega, podendo chegar a 0% quando ela está completamente descarregada.

Potência específica: relação entre quantidade de potência fornecida pela bateria e sua massa, expressa em kW/kg.

Profundidade de descarga (DoD): percentual de energia removida de uma bateria, que vai aumentando conforme se vai descarregando a bateria. Nas baterias de chumbo ácido, quanto maior for a DoD, menor será sua vida útil.

Tensão de circuito aberto (OCV): tensão medida nos terminais da bateria sem que estes estejam ligados a qualquer fonte de consumo.

Vida útil: número de ciclos de carga e descarga que uma bateria pode alcançar.

Os principais parâmetros para a comparação entre diferentes tipos de baterias são sua energia específica, potência específica, vida útil e custo por kWh, além do volume ocupado e sua segurança (MAHMOUDZADEH ANDWARI *et al.*, 2017). Vários tipos de sistemas de armazenamento de energia são comparados com base em sua energia específica e potência específica na Figura 2.12.

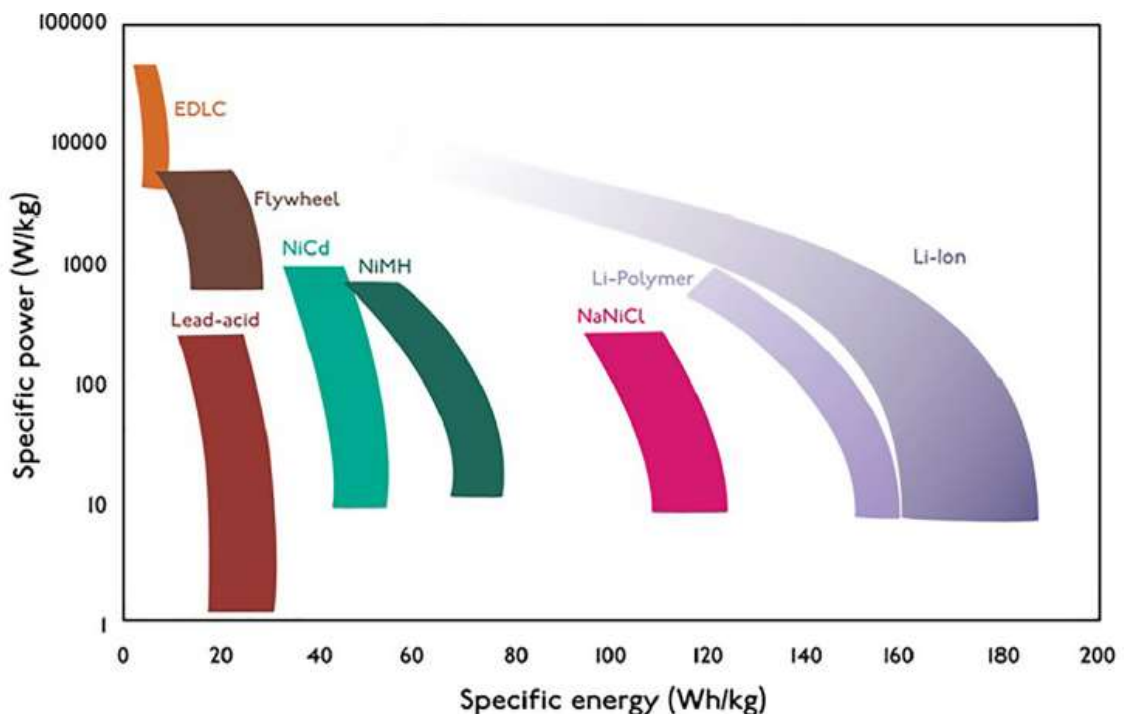


Figura 2.12 – Gráfico de Ragone de diferentes tipos de tecnologia de armazenamento de energia. Fonte: Mahmoudzadeh Andwari *et al.* (2017)

Atualmente existem três principais tipos de baterias no mercado que são adequadas para as aplicações em transportes: as baterias de chumbo ácido, as baterias baseadas em níquel e as baterias baseadas em lítio. Existem ainda três tipos incomuns de baterias que podem ser encontradas no mercado: baterias de sais fundidos de sódio-enxofre (NaS), baterias de metal-ar e as baterias de fluxo (LI; KHAJEPOUR; SONG, 2019).

As baterias de chumbo ácido são constituídas por placas de chumbo imersas em um eletrólito ácido e possuem baixa energia específica, entre 25 a 50 Wh/kg, além de baixa vida útil, tipicamente entre 200 a 1000 ciclos. Sua recarga deve ser realizada por meio de correntes baixas e não devem ser descarregadas completamente, o que pode provocar o fenômeno da “sulfatação” e danificá-las, além de diminuir a sua capacidade de carga (ANGELINE; RAJKUMAR, 2020; VELA, 2018).

Segundo Angeline e Rajkumar (2020), as baterias de hidretos metálicos de níquel (NiMH) tem maiores densidades energéticas, da ordem de 60 a 120 Wh/kg e potência específica de 250 a 1000 W/kg, podendo atingir até 2000 ciclos de vida graças as propriedades de seus materiais.

Já as baterias de íons de lítio (Li-ion) são constituídas por um cátodo de lítio, um ânodo de carbono poroso e um eletrólito não aquoso formado por sais de lítio. Apresentam maior energia específica (Wh/kg) e maior potência específica (W/kg) do que os outros tipos e são as mais utilizadas nos VEs, apresentando tanto alto potencial eletroquímico quanta baixa massa equivalente, além de alta eficiência e longa vida útil (ANGELINE; RAJKUMAR, 2020; VELA, 2018).

As baterias de NaS apresentam alta densidade energética, de até 300 Wh/l, boa eficiência (89 a 92%), longa vida útil (2500 ciclos com até 90% de profundidade de descarga) e capacidade de pulsos de alta potência com respostas rápidas e precisas. Elas necessitam de um sistema extra para garantir a correta temperatura de operação, o que torna seus custos de operação anuais um pouco mais altos, tornando-as mais adequadas para aplicações estacionárias em longa escala. Já as baterias do tipo metal-ar utilizam um metal eletropositivo, como o zinco ou o alumínio em um acoplamento eletroquímico com o oxigênio presente no ar para gerar eletricidade. São compactas e apresentam baixos custos, mas possuem baixa eficiência (50%) e vida útil curta (algumas centenas de ciclos), além de temperaturas de operação limitadas. Por fim, as baterias de fluxo apresentam uma resistência inerente a autodescarga, pois seus eletrólitos são armazenados separadamente em tanques selados. No entanto, possuem altos custos iniciais, uma estrutura de sistema complexa e baixa performance, não tendo ainda grandes aplicações comerciais. (LI; KHAJEPOUR; SONG, 2019).

Há uma grande preocupação no que se refere a segurança das baterias utilizadas nos VEs, como apontado por Zubi *et al.* (2018). As questões de segurança das baterias de Li-ion têm sido amplamente investigadas e o desafio atual consiste em encontrar formas de expandir sua capacidade sem comprometer sua segurança. Um dos maiores problemas apontados pelos autores refere-se ao efeito conhecido como “*thermal runaway*”, provocado pelo aquecimento excessivo das células, que pode ocasionar incêndios ou explosões graves. Além disto, Wen, Yu e Chen (2012) acrescentam que as questões de segurança das baterias de Li-ion estão associadas a condições anormais de abuso, que podem ser mecânicas (como quebras, perfurações, quedas, vibrações, etc.), eletroquímicas (sobrecarga, sobredescarga, curtos-circuitos, geração de gases, etc.) ou térmicas (aquecimento externo, exposição ao fogo, etc.).

Além da questão de segurança, outro ponto bastante importante a ser considerado é a destinação final das baterias descartadas. Conforme apontado por Torabi e Ahmadi (2019), atualmente apenas uma pequena fração das baterias utilizadas são recicladas (menos de 2%) e a grande maioria das baterias descartadas acabam indo para os aterros sanitários. As baterias recarregáveis apresentam taxas de reciclagem um pouco maiores, estimadas em 5%. Os autores afirmam que, com o aumento da frota de VEs, políticas voltadas para a reciclagem das baterias deverão ser implementadas a fim de evitar maiores impactos ambientais relacionados ao descarte incorreto de suas baterias.

O sistema de frenagem regenerativa também representa uma grande inovação presente nos VEs. Enquanto nos ICEVs convencionais o sistema de frenagem é baseado em freios friccionais, que transformam a energia cinética dos veículos em calor, geralmente dissipada sem reaproveitamento, nos VEs o sistema de frenagem regenerativa pode fornecer energia através da recuperação e armazenamento da energia cinética do veículo quando em desaceleração. Esta energia pode ser armazenada em dispositivos de armazenamento de eletricidade (baterias) ou de armazenamento de energia mecânica (*flywheels*) (KUMAR; REVANKAR, 2017; LI; KHAJEPOUR; SONG, 2019).

Segundo Li, Khajepour e Song (2019), existem atualmente quatro métodos de se realizar a frenagem regenerativa nos VEs. O primeiro deles consiste no uso de um motor/gerador elétrico e baterias ou supercapacitores. Durante a desaceleração, o motor/gerador atua como um gerador, convertendo a energia cinética em eletricidade, que é armazenada nas baterias ou supercapacitores. Quando o VE passa para a fase de aceleração, o motor/gerador passa a atuar como um motor elétrico e impulsiona o VE através da energia fornecida pelo sistema de armazenamento. O segundo método consiste no uso de acumuladores hidráulicos. Durante a desaceleração, um conjunto de bomba e motor transfere um fluido hidráulico de um reservatório

de baixa pressão para um acumulador hidráulico (HACC), que converte a energia cinética em energia hidráulica. Quando o VE necessita de energia, a energia hidráulica armazenada pode ser liberada através do conjunto bomba e motor, que opera como um motor hidráulico auxiliar. Já o terceiro método faz uso de um volante de inércia (*flywheel*), que armazena a energia cinética desprendida na frenagem como energia rotativa. Por fim, a energia de frenagem pode ser armazenada como energia potencial através de molas ou elastômeros.

Ainda de acordo com Li, Khajepour e Song (2019), os métodos regenerativos que utilizam HACCs e *flywheels* são mais eficientes no reaproveitamento de energia. O sistema regenerativo hidráulico apresenta a capacidade de carregamentos e descarregamentos mais rápidos, alta densidade energética e grande capacidade de recuperação da energia cinética desprendida durante as frenagens. Em contraste, o sistema regenerativo com motor e bateria não é adequado para a realização de recargas e descargas frequentes, que podem causar sobreaquecimento e redução da vida útil das baterias. Já os sistemas regenerativos com molas possuem baixa eficiência. A Figura 2.13 demonstra o fluxo de energia comparativo entre um VE sem sistema de frenagem regenerativa (a) e com o sistema (b) (QIU *et al.*, 2018).

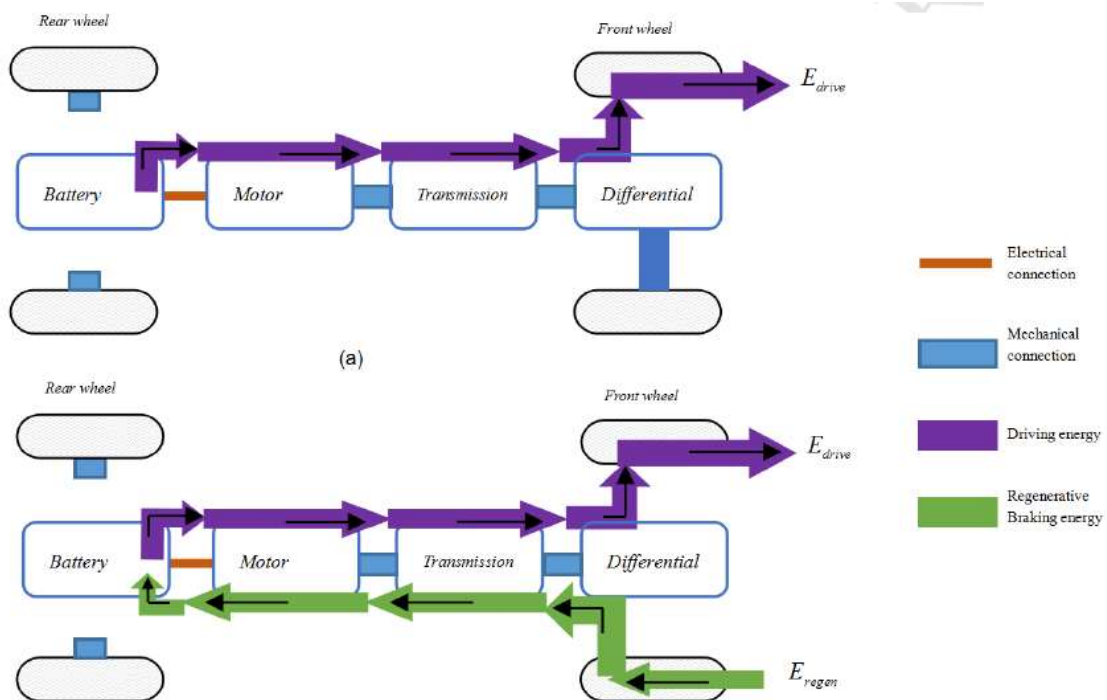


Figura 2.13 – Fluxo energético de um VE sem e com frenagem regenerativa.
Fonte: Qiu *et al.* (2018)

O Sistema de Gerenciamento de Energia (EMS) merece especial destaque em um VE devido a sua complexidade. Seja em veículos com uma única fonte de energia (exemplo: BEVs)

ou com múltiplas fontes de energia (HEVs), o sistema tem um papel crucial para a obtenção de uma performance satisfatória dos VEs, sendo responsável pela supervisão de sua capacidade de potência e utilização da potência máxima disponível. O EMS é responsável pela coleta e análise dos sinais de entrada dos subsistemas dos VEs para a elaboração de perfis padronizados de direção, controle do fluxo de potência do sistema de armazenamento de energia, além de propor técnicas de condução eficientes e sugerir rotas seguras e com maior eficiência energética com base no tráfego rodoviário e seu status. (KUMAR; REVANKAR, 2017).

Diferentes Estratégias de Controle do Sistema de Gerenciamento de Energia (EMSCS) podem ser aplicadas ao EMS e podem ser divididas em dois tópicos principais, sendo Estratégias de Controle Baseadas em Regras ou Estratégias de Controle Baseadas em Otimização. (ÇAĞATAY BAYINDIR; GÖZÜKÜÇÜK; TEKE, 2011).

As estratégias de controle baseadas em regras envolvem a eficácia no controle de supervisão em tempo real do fluxo de potência no trem de força. Regras são elaboradas com base na expertise humana, intuição, heurística e modelos matemáticos, geralmente com o objetivo central de realizar o nivelamento da carga, que se trata de colocar o ponto de operação do ICE (no caso de um HEV) o mais próximo possível de seu ponto de máxima eficiência. Esta estratégia pode ser subdividida em dois métodos, fuzzy e determinístico. O método determinístico é baseado em análises do fluxo de energia com regras precisas, podendo ser realizado através de termostato, seguidor de potência, seguidor de potência modificado ou estratégias baseadas no estado da máquina. O método fuzzy utiliza a lógica fuzzy para lidar com estratégias de controle convencionais, adaptativas e preditivas para lidar com o raciocínio aproximado. As estratégias baseadas em regras são estratégias em tempo real com vantagens como simplicidade, confiabilidade, menor exigência computacional e adaptabilidade natural para aplicações online. No entanto, seu desenvolvimento é lento devido à dificuldade de definição de regras precisas e não envolvem minimização ou otimização, o que não facilita a economia de combustível (ÇAĞATAY BAYINDIR; GÖZÜKÜÇÜK; TEKE, 2011; LI; KHAJEPOUR; SONG, 2019).

As estratégias de controle baseadas em otimização são utilizadas para minimizar o consumo de combustível ou a emissão de GEE (no caso de HEVs) através do cálculo do torque de referência ótimo e da relação de transmissão. Utilizam uma função de minimização de custos que representa o consumo de combustível ou as emissões ao longo do tempo ou instantaneamente e podem ser classificadas como soluções de otimização global ou em tempo real. A solução de otimização global visa minimizar a perda cumulativa de energia ao longo de todo o ciclo de condução, que deve ser previamente conhecido. A estratégia de otimização

global pode ser dividida em Programação Linear, Abordagem de Teoria de Controle, Programação Dinâmica, Programação Dinâmica Estocástica, Teoria dos Jogos e Algoritmo Genérico. Já a solução de otimização em tempo real analisa o consumo energético e a variação da energia armazenada e reduz os problemas da otimização global em uma sucessão de problemas de otimização local. Ela pode ser dividida em Minimização do Combustível Equivalente, Controle Preditivo do Modelo, Controle Inteligente, Controle Robusto e Estratégias de Controle de Desacoplamento (ÇAĞATAY BAYINDIR; GÖZÜKÜÇÜK; TEKE, 2011; LI; KHAJEPOUR; SONG, 2019). A Figura 2.14 demonstra a classificação das EMSCS que podem ser empregadas em um HEV.

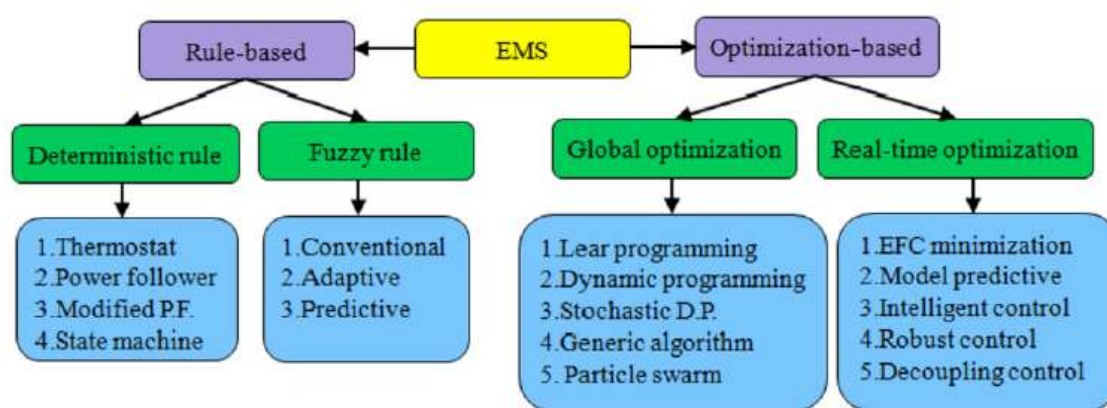


Figura 2.14 – EMSCS empregadas em um HEV.
Fonte: Li, Khajepour e Song (2019)

2.1.4. Mercado de veículos elétricos

A frota de VEs está se expandindo em um ritmo acelerado, tendo ultrapassado, em 2018, os 5,1 milhões de veículos, 2 milhões a mais do que o ano anterior e quase o dobro do número de vendas. Os maiores mercados continuam sendo a China, com uma frota de aproximadamente 2,3 milhões de unidades, seguida pela Europa, com 1,2 milhões de VEs e pelos Estados Unidos, com 1,1 milhão. A Noruega segue sendo o líder mundial em termos de *market share*, onde 46% das vendas de novos veículos em 2018 foram VEs (IEA, 2019b). A Figura 2.15 demonstra o crescimento das vendas de VEs e a evolução do *market share* no período entre 2013 a 2018 nos principais mercados do mundo. Na mesma figura ainda fica destacada a participação dos BEVs e PHEVs (veículos híbridos plug in) no mercado, através da diferenciação das barras mais claras (PHEVs) e mais escuras (BEVs).

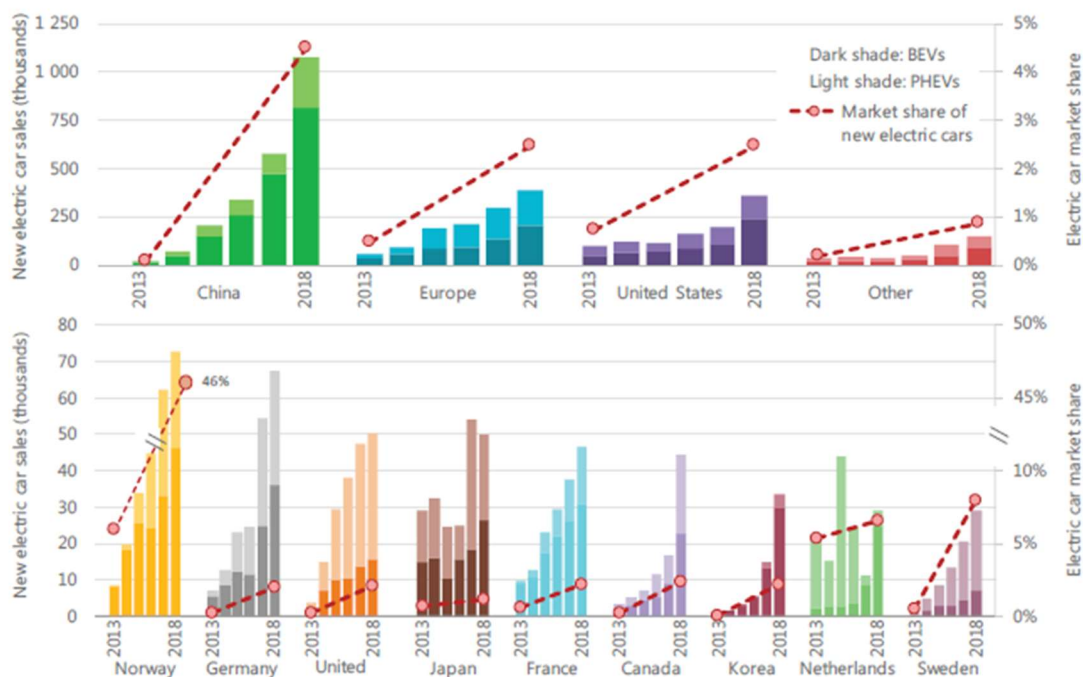


Figura 2.15 – Evolução das vendas de VEs e *market share* nos principais mercados do mundo.
Fonte: IEA (2019b)

IEA (2019b) elaborou dois cenários de projeção para o crescimento da frota e do número de vendas de VEs, classificados pelo tipo de veículo e pelos principais mercados, conforme pode ser observado na Figura 2.16. O cenário *New Policies* é baseado no desenvolvimento dinâmico na implementação de políticas de incentivo e avanços tecnológicos, enquanto que o cenário *EV30@30* é sustentado pela participação proativa do setor privado, avanços tecnológicos promissores e engajamento global no apoio às políticas dos VEs. Para 2030, as vendas globais de VEs alcançam 23 milhões de veículos e a frota excede os 130 milhões de veículos no cenário *New Policies*. Já para o cenário *EV30@30*, as vendas e a frota de VEs esperadas são próximas do dobro para 2030: as vendas alcançam 43 milhões e a frota ultrapassa os 250 milhões de veículos. Em ambas as projeções, o mercado de VEs é dominado pelos veículos leves BEV, com maior participação na frota total de VEs.

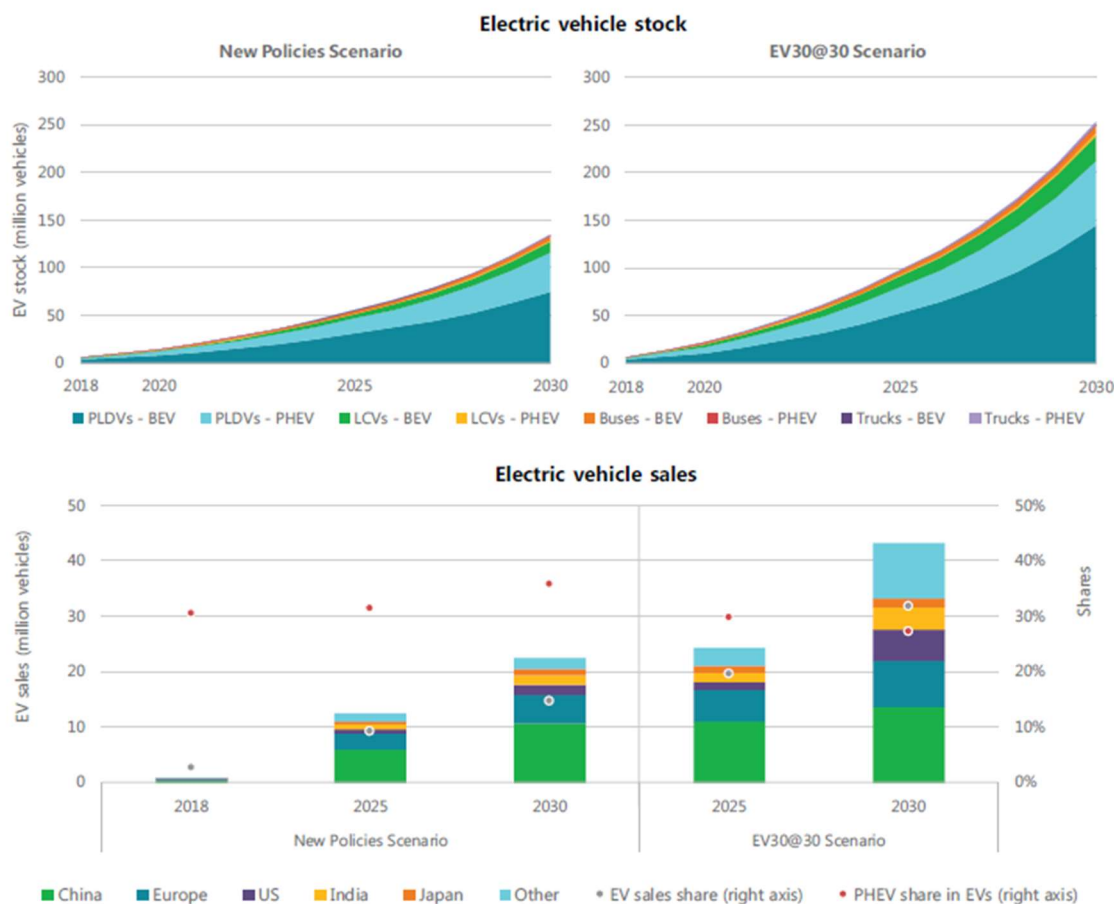


Figura 2.16 – Cenários de projeção para frota de VEs e vendas até 2030.
Fonte: IEA (2019b)

A EPE (2018a) elaborou um estudo de longo prazo para servir de documento de apoio para o Plano Nacional de Energia 2050, nomeado de Eletromobilidade e Biocombustíveis, onde é apresentado um comparativo entre diferentes projeções realizadas para a frota global de VEs em 2030, disponível em um estudo realizado por JP Morgan (2018). A Figura 2.17 apresenta o resultado deste estudo comparativo, onde fica evidente a grande dispersão entre as diferentes projeções para o tamanho da frota global de VEs e sua participação na frota global de veículos, com projeções variando entre 2% a 20% da frota futura projetada, estimada em 1,4 bilhão de veículos em 2030. Na maioria dos casos, as projeções demonstradas no comparativo apresentam tendência a uma alta taxa de crescimento até 2040 ou mais adiante.

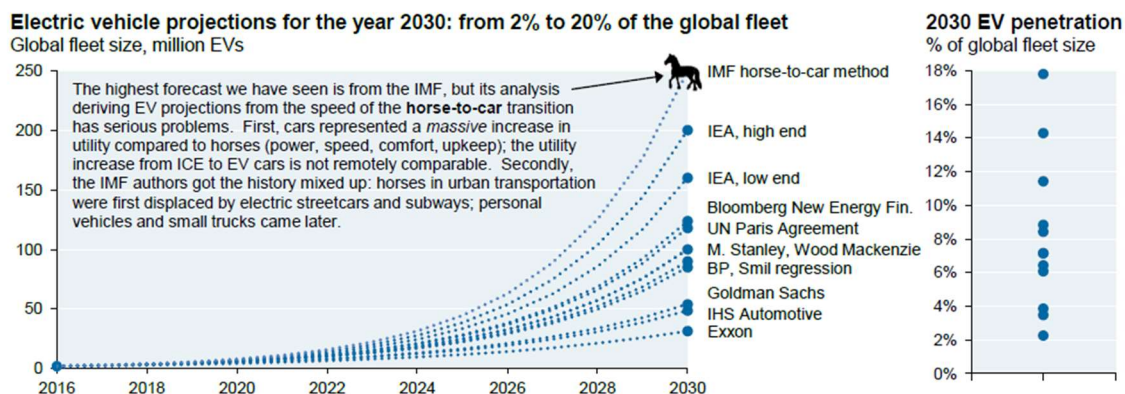


Figura 2.17 – Projeções de VEs no mundo até 2030.
Fonte: JP Morgan (2018)

O mercado de VEs no Brasil está em um estágio bastante inicial quando comparado aos grandes mercados do mundo, como China, Estados Unidos e Europa, embora tenha apresentado altas taxas de crescimento anual nos últimos cinco anos. Segundo dados da ANFAVEA (2020), o número de VEs licenciados nos últimos cinco anos subiu, em média, aproximadamente 70% por ano, com destaque para o ano de 2019, onde foram licenciados 11.844 novos VEs, representando um crescimento de 109% em relação ao ano anterior. A Figura 2.18 demonstra a evolução do número de licenciamentos de VEs no Brasil e a frota de VEs acumulada estimada.

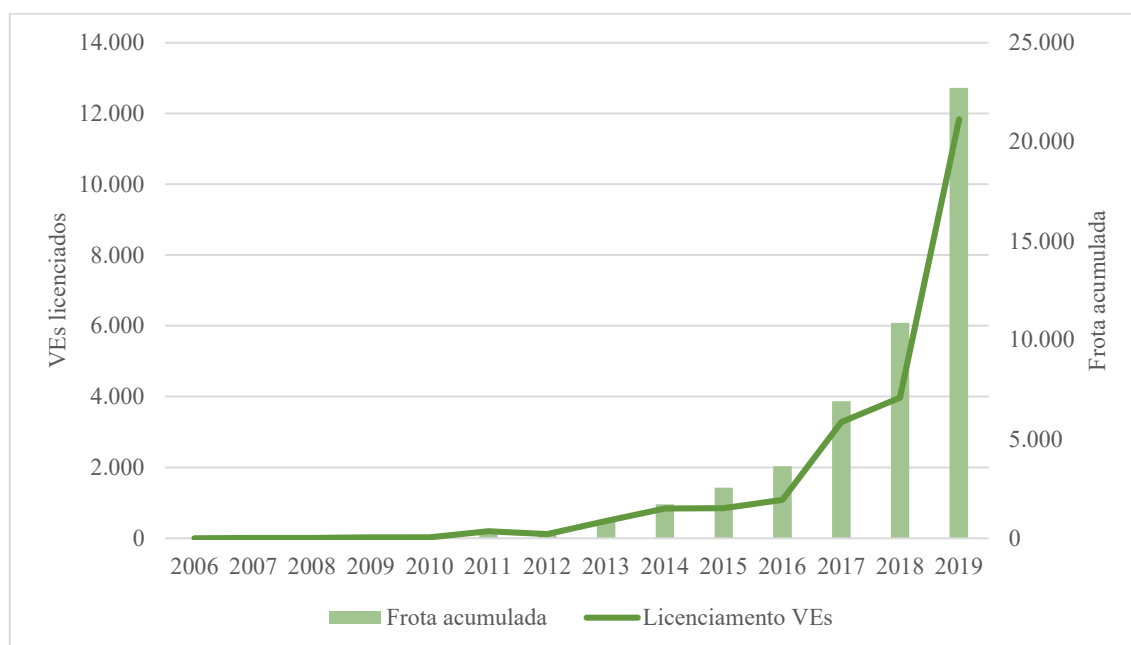


Figura 2.18 – Evolução do número de VEs licenciados no Brasil e frota acumulada estimada.
Fonte: Elaborado a partir de ANFAVEA (2020)

(EPE, 2018a) elaborou dois cenários de projeção para a eletromobilidade no Brasil, para um horizonte até 2050, denominados de Cenário de Referência e Cenário Alternativo. No

Cenário de Referência, é proposta uma transição energética longa, denominada de “Processo de Hibridização”, onde existe uma coexistência robusta entre os veículos a combustão interna (CI) e os veículos híbridos (HEVs) e uma resiliência robusta dos CI em relação aos veículos elétricos (VEs), em face dos desafios a serem superados pelas tecnologias veiculares e aos desafios atuais do Brasil (renda per capita, distribuição de renda, crise fiscal, prioridade de políticas públicas, etc.). Já no Cenário Alternativo, é proposta uma transição energética curta, denominada de “Maior Eletromobilidade”, sob um contexto de superação dos desafios de forma mais rápida do que o previsto, havendo uma aceleração da entrada da eletromobilidade após 2030 e culminando na substituição plena dos veículos até 2045. A Figura 2.19 apresenta os dois cenários projetados, com a participação dos veículos CI, híbridos e VEs no licenciamento de veículos leves no Brasil.

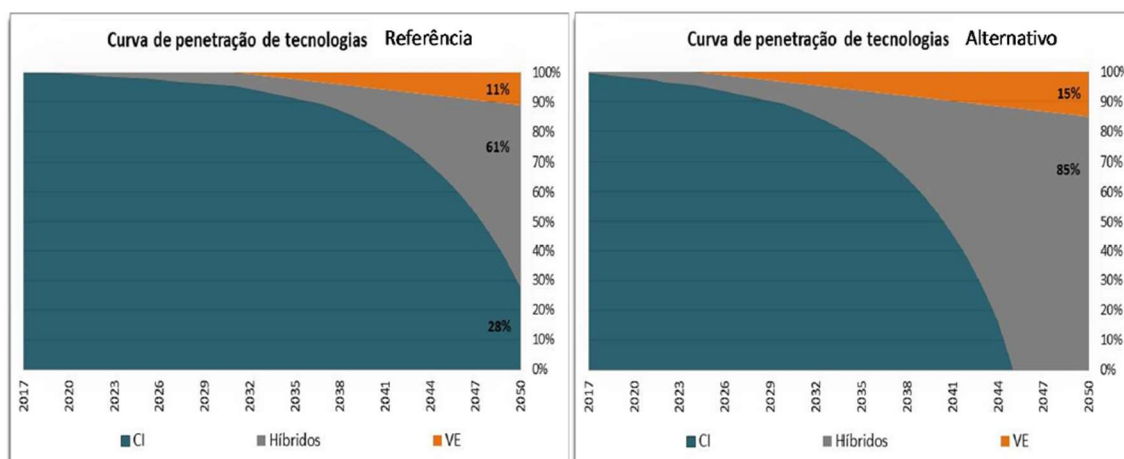


Figura 2.19 – Cenários de penetração de veículos CI, híbridos e VEs no total de licenciamento de veículos leves no Brasil.

Fonte: EPE (2018a)

2.2. Recarga de veículos elétricos

De forma geral, a maioria dos VEs possuem dispositivos de armazenamento de energia elétrica, o que torna as tecnologias de recarga muito importantes para sua comercialização, uma vez que podem reduzir a ansiedade de autonomia dos possíveis compradores, sendo esta uma das principais causas de rejeição aos VEs (LI; KHAJEPOUR; SONG, 2019).

Ainda de acordo com Li, Khajepour e Song (2019), existem dois métodos de recarga disponíveis para os VEs: a recarga indutiva e a recarga condutiva. Na recarga indutiva, uma ERVE produz um campo eletromagnético através de uma bobina de indução, enquanto um

dispositivo eletrônico com uma bobina de indução correspondente recebe a energia do campo magnético e a converte em corrente elétrica para recarregar a bateria. Este método apresenta as vantagens de robustez, segurança, compatibilidade de potência e durabilidade, mas a eficiência é reduzida conforme a distância entre o dispositivo e a ERVE aumenta. Por outro lado, a recarga condutiva necessita de um condutor entre a fonte de energia e o veículo, sendo necessário levar em consideração questões sobre segurança e configurações de interface. Devido a sua maior simplicidade, atualmente a maioria das recargas de VEs é feita através deste método, de forma não controlada, onde uma vez conectado a ERVE através de um cabo condutor, o VE recarrega a uma potência fixa até que a bateria esteja completa ou que o processo seja interrompido.

Mouli, Venugopal e Bauer (2017) apontam cinco tecnologias que podem desempenhar um papel importante na infraestrutura de recarga dos VEs: *smart charging*, a tecnologia *vehicle-to-grid* (V2G), a recarga através de painéis fotovoltaicos, a recarga sem contato e *on-road charging*.

A tecnologia *smart charging* faz uso de três habilidades únicas dos VEs que fazem deles excelentes ativos na rede elétrica: a flexibilidade de variar a potência de recarga, a capacidade de aumentar ou diminuir rapidamente a potência de recarga e a habilidade de carregar e descarregar ao mesmo tempo. Na *smart charging* a potência de recarga do VE e sua direção são controladas continuamente (recarga dinâmica), fornecendo uma série de benefícios para os proprietários do VE e para os provedores da infraestrutura de recarga, como redução dos custos de recarga baseados no preço da energia, redução das perdas de distribuição, redução da demanda de pico e uso dos VEs como armazenadores de energia (MOULI; VENUGOPAL; BAUER, 2017).

Segundo Mouli, Venugopal e Bauer (2017), a tecnologia *vehicle-to-grid* (V2G) consiste no descarregamento de um VE para prover energia para a rede, sendo um tipo especial de *smart charging*. Esta tecnologia permite a exploração de uma série de oportunidades como o uso de energia renovável previamente armazenada nos VEs, participação nos mercados de energia como gerador e fornecedor de serviços auxiliares.

De acordo com Mouli, Venugopal e Bauer (2017), a recarga de VEs através de painéis fotovoltaicos tem o potencial de garantir que o uso dos VEs resulte em emissões líquidas nulas de CO₂. Com custos cada vez menores e mais acessíveis dos painéis fotovoltaicos e sua facilidade de integração com o sistema de distribuição, cada vez mais o uso de energia solar renovável torna-se viável para a recarga de VEs. As principais vantagens desta tecnologia são a pequena distância entre os painéis fotovoltaicos e o VE (perdas mais baixas), a possibilidade de uso das baterias dos VEs como armazenadores de energia gerada pelas placas fotovoltaicas,

a redução da demanda de energia da rede de distribuição e a redução dos custos de recarga dos VEs.

A recarga sem contato de VEs utiliza tecnologia de transferência de potência através de indutores, também chamada de recarga indutiva, como comentado anteriormente. Sua principal vantagem é a eliminação do uso do cabo condutor, o que aumenta o conforto do proprietário do VE e elimina o risco de choque elétrico em condições climáticas adversas. Além disso, é um sistema inerentemente seguro, com baixa manutenção e alta confiabilidade, permitindo ainda o desenvolvimento de recargas autônomas para veículos autônomos (MOULI; VENUGOPAL; BAUER, 2017).

Por fim, a recarga *on-road* está em desenvolvimento de seu estado da arte, sendo um tipo especial de recarga sem contato. Ela tem potencial para aumentar a autonomia limitada dos VEs através da transferência de energia para os veículos enquanto estes estão em movimento. Neste cenário, carregadores indutivos seriam colocados a distâncias pré-definidas ao longo de rodovias e a energia seria transferida pelo tempo em que os VEs estivessem sobre eles. As principais vantagens desta tecnologia são a possibilidade de recarga dos VEs a partir de fontes renováveis disponíveis próximas ao local onde estão, redução do tempo de espera para a recarga e redução da ansiedade de autonomia (MOULI; VENUGOPAL; BAUER, 2017).

2.2.1. Modos de recarga condutiva

Segundo Van den Bossche (2010, p. 518), “o processo de recarga de uma bateria tipicamente envolve duas fases, sendo uma a fase principal de recarga, onde a maioria da energia é recarregada na bateria e uma fase final de recarga, onde a bateria é condicionada e balanceada.” Van den Bossche (2010) ainda afirma que a maioria dos carregadores utilizados atualmente empregam um método de recarga onde a corrente elétrica I é mantida constante durante a fase principal de recarga, enquanto a tensão U é mantida constante durante a fase final da recarga. Essa característica pode ser visualizada na Figura 2.20.

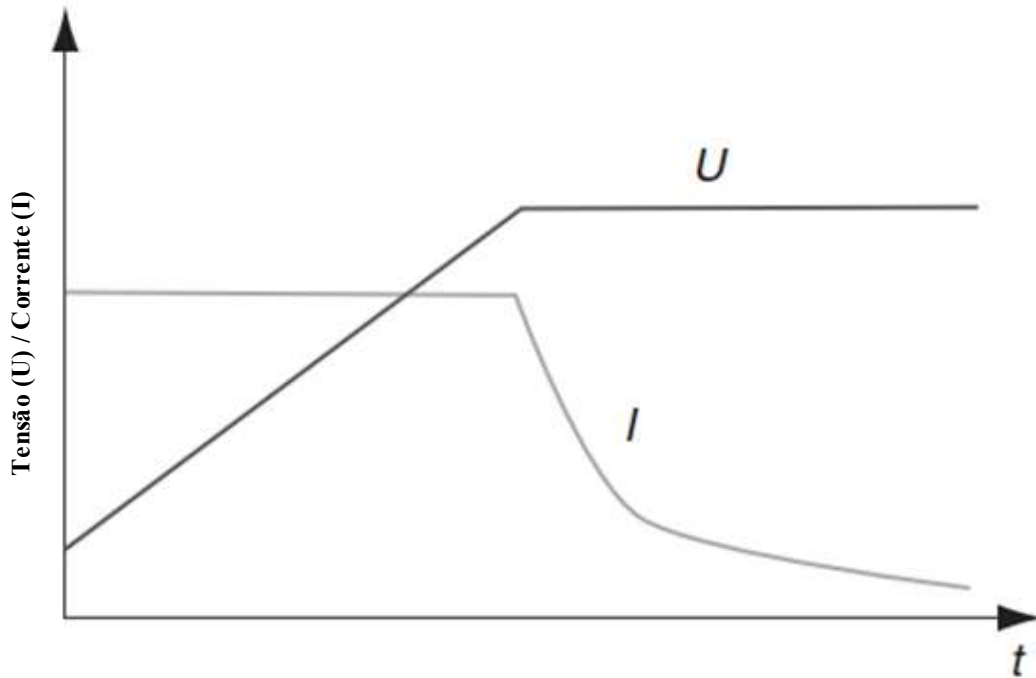


Figura 2.20 – Curva característica de tensão e corrente durante a recarga de uma bateria.
Fonte: Van den Bossche (2010)

O método de recarga mais difundido no mundo atualmente é o condutivo, visto que o método indutivo se encontra em desenvolvimento. A maioria dos VEs disponíveis no mercado atualmente pode ser recarregada em uma simples tomada doméstica, mas ERVE pode ser necessária em alguns casos (GAURAV; MANIMARAN, 2015).

O número de ERVEs ao redor do mundo foi estimado em 5,2 milhões de unidades no final de 2018 (IEA, 2019b). Somente em 2018 foram instaladas 1,6 milhão de novas ERVEs, sendo que 90% destas foram do tipo privada. A Figura 2.21 mostra a evolução do número de ERVEs instaladas no mundo no período de 2013 a 2018. Pode-se perceber que a participação das ERVEs públicas (sejam *fast charger* ou *slow charger*) tem aumentado nos últimos anos, o que contribui para a popularização do uso dos VEs.

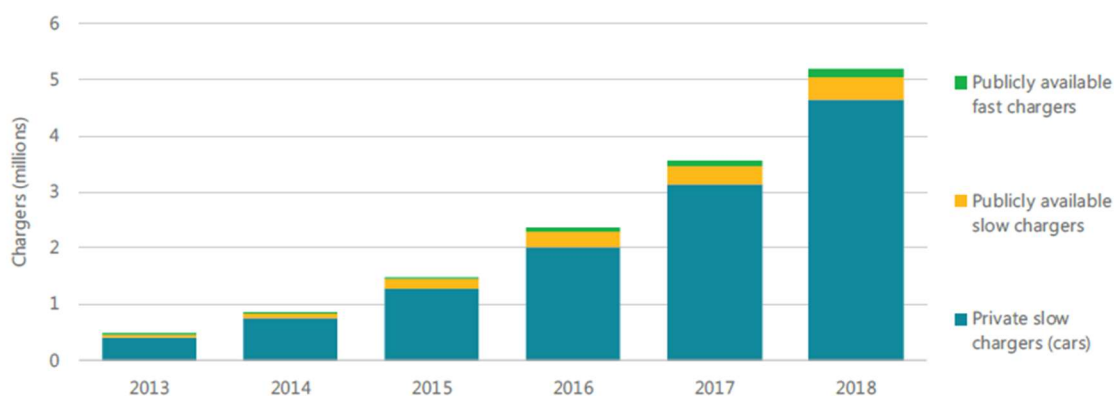


Figura 2.21 – Evolução do número de ERVEs no mundo entre 2013 a 2018.
Fonte: IEA (2019b)

A recarga condutiva pode ser realizada tanto em corrente contínua (CC) quanto em corrente alternada (CA), em diferentes modos, conforme padronizado internacionalmente na IEC 61851-1 (VAN DEN BOSSCHE, 2010). Segundo Gaurav e Manimaran (2015), foram definidos quatro diferentes modos de recarga na IEC 61851-1, levando em consideração os seguintes pontos:

- O tipo de potência recebida pelo VE (CC, monofásica ou trifásica CA);
- O nível de tensão (110V para monofásico e 480V para trifásico);
- A presença ou ausência de aterramento e linhas de controle para permitir a comunicação de uma ou duas vias entre o VE e a ERVE;
- A presença e a localização do dispositivo de proteção.

Modo 1

O modo 1 refere-se a recargas onde o VE é conectado a uma rede CA monofásica de até 250V ou trifásica de até 480V através de uma tomada padronizada conforme os requisitos nacionais e internacionais adotados, com uma corrente máxima limitada a 16 A. Ele corresponde a uma infraestrutura não dedicada, geralmente utilizadas em residências, onde nenhuma infraestrutura adicional é necessária. É o modo de recarga mais lento existente e permite que um VE conectado à rede elétrica tenha sua bateria recarregada durante a noite, atingindo a recarga completa antes do amanhecer, sendo esta uma prática que garante baixas cargas da rede de distribuição e economia nas recargas pelo consumo de energia elétrica de baixo custo disponibilizada no período noturno. Embora necessite de uma infraestrutura

simplificada, é muito importante que a instalação elétrica contenha proteções inerentes a um sistema elétrico, como disjuntores, conexão adequada à malha de aterramento e interruptor diferencial residual, para evitar condições perigosas durante a recarga (GAURAV; MANIMARAN, 2015; VAN DEN BOSSCHE, 2010).

Modo 2

De acordo com Van den Bosche (2010) e Gaurav e Manimaran (2015), o modo 2 refere-se a recargas onde o VE é conectado a uma rede CA com as mesmas limitações de tensão do modo 1, mas com correntes limitadas a 32 A. Este modo ainda permite o uso de tomadas convencionais, mas oferece uma proteção adicional através da adição de uma caixa de controle contendo um conector com um pino de controle. Este modo de recarga é usado principalmente para instalações privadas dedicadas a recarga e foi adotado principalmente nos Estados Unidos, sendo inicialmente considerado como uma solução transitiva. Sua principal desvantagem é que a caixa de controle protege somente o cabo e o VE, mas não o *plug* em si, sendo este um dos componentes mais propensos a ser danificado durante o uso.

Modo 3

O modo 3 refere-se a recargas com conexão direta entre o VE e uma rede CA através de uma ERVE, com correntes limitadas a, no máximo, 63 A. Nestas ERVEs a função do pino de controle é estendida, permanecendo permanentemente conectado à rede CA e ao VE, sendo responsável pelo monitoramento do estado da conexão entre o VE e a rede e da integridade da proteção de aterramento do VE, além de possuir as funções de energização e desenergização do sistema e seleção da taxa de recarga. O modo 3 também é conhecido como solução de recarga “semirrápida”, pois permite que a bateria seja completamente recarregada em poucas horas. É utilizado geralmente em ERVEs públicas e tipicamente conectado a redes trifásicas. O uso do pino de controle permite ainda o desenvolvimento de soluções alternativas, como a transferência de dados entre a ERVE e o VE, que podem ser utilizados para diversas finalidades, como a implementação de recargas inteligentes ou sistemas de pagamentos de recarga (GAURAV; MANIMARAN, 2015; VAN DEN BOSSCHE, 2010).

Modo 4

Conforme Van den Bosche (2010) e Gaurav e Manimaran (2015), o modo 4 refere-se a recargas que utilizam ERVEs permanentemente conectadas a uma rede trifásica CA, responsáveis pela conversão para uma rede CC. As ERVEs deste tipo são amplamente utilizadas como recargas rápidas ou ultrarrápidas, com tempos de recarga variando de 20 a 30 min, correntes de até 125 A e tensões da ordem de 500 V. No entanto, desenvolvimentos constantes nos campos das baterias e dos conversores de potência têm possibilitado potências de recarga cada vez mais altas e, conseqüentemente, tempos de recarga cada vez menores, como é o caso do Supercharger 3ª geração da Tesla. O novo carregador, com potência de recarga de 250 kW, é capaz de fornecer 120 quilômetros de autonomia a um Tesla Model 3 em 5 minutos de recarga (O’KANE, 2019).

A Tabela 2.1 sintetiza as principais características dos modos de recarga, de acordo com a IEC 61851-1.

Tabela 2.1 – Modos de recarga conforme IEC 61851-1.

Modo de recarga	Corrente máxima por fase	Tempo de recarga	Carregador de bateria do veículo
Modo 1	16 A	4 a 8 horas	On board
Modo 2	32 A	2 a 4 horas	On board
Modo 3	63 A	1 a 2 horas	On board
Modo 4	400 A DC	5 a 30 min	Off board

Fonte: Elaborado a partir de Van den Bosche (2010) e Gaurav e Manimaran (2015).

Embora o uso de ERVEs públicas capazes de realizar recargas rápidas ou ultrarrápidas possa afetar positivamente a utilização dos BEVs, devem ser adotadas medidas adicionais de proteção de forma a garantir a preservação das baterias, visto que o aumento da temperatura devido ao calor acumulado nas células ou barramentos ao final de uma recarga rápida representa riscos potenciais de segurança e degradação acelerada (TOMASZEWSKA *et al.*, 2019). Neste sentido, os Sistemas de Gerenciamento Térmico das Baterias (BTMS) são fundamentais para mitigar condições térmicas danosas às baterias em viagens de longa distância, onde múltiplos eventos de recarga rápida são necessários (NEUBAUER *et al.*, 2015).

Shirk e Wishart (2015) demonstraram através de um teste de campo a influência das recargas rápidas na degradação das baterias de um BEV e como os BTMS são importantes para evitar danos às baterias. O estudo apresentado pelos autores quantificou os efeitos nas baterias de um conjunto de veículos modelo Nissan Leaf 2012 que foram recarregados exclusivamente através de recargas rápidas em corrente contínua e comparou os resultados com um conjunto idêntico de veículos que foram recarregados exclusivamente utilizando ERVEs do tipo lenta operando em Modo 2. Os veículos foram comissionados para acumular quilometragem rodada em trechos urbanos e rodoviários nas estradas de Phoenix, Arizona e foram monitorados durante toda a execução dos testes, até atingirem 50 mil milhas percorridas. Os resultados mostraram que, embora os BEVs recarregados em Modo 4 tenham apresentado maior degradação de suas baterias ao final do teste, quando comparados aos BEVs recarregados exclusivamente em Modo 2, a diferença encontrada é pouco significativa quando comparada a degradação sofrida pelas baterias de ambos os conjuntos de veículos conforme seu uso. O estudo concluiu ainda que, apesar de uma maior degradação das baterias submetidas a recargas rápidas, a operação dos dois grupos de veículos foi bastante similar e as maiores diferenças encontradas foram na temperatura das baterias durante a recarga.

2.2.2. Tipos de conectores

As recargas de VEs podem ser classificadas em recargas lentas, semirrápidas e rápidas. O tempo de recarga está relacionado com a potência de saída do carregador disponível para recarregar o VE. Cada carregador pode ser utilizado em conjunto com conectores diferentes, projetados para o uso em baixa ou alta potência, seja em CA ou CC (ZAP-MAP, 2020).

Existem diferentes tipos de conectores de recarga ao redor do mundo, não existindo apenas um único modelo padronizado para as recargas de VEs, assim como existem diferentes níveis de potência de recarga. Segundo Mouli, Venugopal e Bauer (2017), atualmente existem três tipos de conectores de recarga em CA: o Tipo 1 SAE J1772-2009, utilizado nos Estados Unidos, o Tipo 2 Mennekes, utilizado na Europa e o carregador Tesla. Para recargas em CC também existem três modelos de conectores, sendo o Tipo 4 CHAdeMO, o CCS/Combo (*Combined Charging System*) e os carregadores Tesla americanos e europeus. A Tabela 2.2 apresenta um resumo comparativo entre os tipos de conectores de recarga existentes, seus padrões de comunicação e níveis de potência de recarga.

Tabela 2.2 – Tipos de conectores e níveis de recarga CA e CC.

Conector	Número de pinos (Comunicação)	Nível de recarga	Tensão, Corrente e Potência máximas
Tipo 1 SAE J1772	3 pinos de potência - L1, N, E 2 pinos de controle - CP, PP (PWM sobre CP)	CA nível 1	1Φ 120V, 16A, 1,9 kW
		CA nível 2	1Φ 240V, 80A, 19,2 kW
Tipo 2 Mennekes	5 pinos de potência - L1, L2, L3, N, E 2 pinos de controle - CP, PP (PWM sobre CP)	CA nível 1	1Φ 230V, 32A, 7,4 kW
		CA nível 2	3Φ 400V, 63A, 43 kW
Tipo 4 CHAdeMO	3 pinos de potência - DC+, DC-, E 7 pinos de controle - (comunicação CAN)	CC nível 3	200 - 500V, 400A, 200 kW
SAE CCS Combo	3 pinos de potência - DC+, DC-, E 2 pinos de controle - CP, PP (PLC sobre CP, PE)	CC nível 3	200-1000 V DC, 350A, 350 kW
Tesla	3 pinos de potência - DC+, DC-, E (ou) L1, N, E 2 pinos de controle - CP, PP	CC nível 3	Model S, 400V, 300A, 120 kW

Fonte: Elaborado a partir de Mouli, Venugopal e Bauer (2017).

O conector Tipo 1 SAE J1772 é utilizado somente como entrada monofásica para recargas em redes CA. Possui formato circular com diâmetro de 43 mm e 5 pinos com diferentes bitolas, conforme apresentado na Figura 2.22. Os pinos de detecção de proximidade e controle piloto exercem funções específicas durante o carregamento. Enquanto o pino de detecção de proximidade previne que o VE se movimente enquanto ainda está conectado a ERVE, o pino de controle piloto realiza a comunicação entre o VE e a ERVE através de um sinal de onda quadrada, realizando o monitoramento e controle da corrente de recarga. Este conector é principalmente utilizado em VEs comercializados na América do Norte, como por exemplo o Nissan Leaf, Chevrolet Volt, Toyota Prius Plug-in Hybrid, Tesla S (através de adaptador) e Kia Soul EV. (CPFL ENERGIA, 2017a).

Tipo 1 SAE J1772



Figura 2.22 – Conector de recarga Tipo 1 SAE J1772.
Fonte: Adaptado de CPFL Energia (2017a)

O conector Tipo 2 Mennekes foi desenvolvido pela empresa alemã Mennekes, de acordo com a norma IEC 62196-2. Este padrão foi adotado pela Associação dos Fabricantes Europeus de Automóveis (ACEA) e é utilizado nos VEs comercializados no continente europeu. O conector tipo 2 Mennekes pode ser utilizado nos três níveis de recarga (lenta, semirrápida e rápida), todos em corrente alternada, seja monofásica ou trifásica. Assim como o conector tipo 1, o tipo 2 utiliza o pino de controle piloto para comunicação com o VE sob recarga e a ERVE, de forma a garantir a segurança de ambos durante o carregamento. Alguns VEs que utilizam este padrão são o Renault Kangoo Z.E., Renault ZOE, BYD e6, o BMW i3 e o Volkswagen e-Up! (CPFL ENERGIA, 2017b). A Figura 2.23 apresenta um conector do tipo 2 Mennekes com sua pinagem correspondente.

Tipo 2 Mennekes

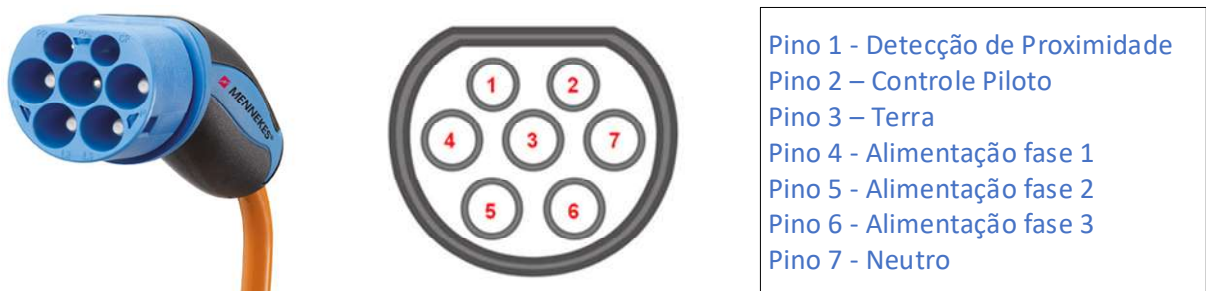
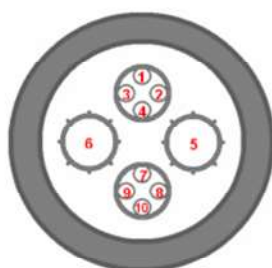


Figura 2.23 – Conector de recarga tipo 2 Mennekes.
Fonte: Adaptado de CPFL Energia (2017b)

O conector de recarga CHAdeMO foi desenvolvido por uma associação de empresas japonesas, composta pela Tokyo Electric Power Company, Nissan, Mitsubishi, Toyota e Fujy Heavy Industries. Este conector foi desenvolvido para atender ao mercado de recargas rápidas em CC e realiza a comunicação entre a ERVE e o VE via protocolo CAN (*Controller Area Network*). É um padrão muito utilizado no Japão e Estados Unidos, sendo compatível com o Nissan Leaf, Mitsubishi i-MiEV, Peugeot iOn, entre outros (CPFL ENERGIA, 2017c). A Figura 2.24 demonstra um conector deste tipo e a função de cada um de seus pinos.

CHAdeMO



Pino 1 - Referência de Terra
Pino 2 – Relé 1 de controle do VE
Pino 3 – sem atribuição
Pino 4 – Controle de recarga
Pino 5 – Energia (linha negativa)
Pino 6 – Energia (linha positiva)
Pino 7 - Detecção de proximidade
Pino 8 - Comunicação +
Pino 9 - Comunicação -
Pino 10 - Relé 2 de controle do VE

Figura 2.24 – Conector de recarga CHAdeMO.
Fonte: Adaptado de CPFL Energia (2017c)

O conector de recarga CCS (*Combined Charging System*), conhecido como Combo, permite tanto a recarga rápida em CC quanto a recarga (lenta ou rápida) em CA. Este modelo foi desenvolvido através de uma parceria entre a SAE e a IEC, sendo divulgado oficialmente em 2012 e foi adotado inicialmente por oito montadoras, dentre as quais estão a Audi, a BMW, a Ford e General Motors, entre outras. Embora o objetivo fosse corrigir a existência de diferentes padrões de conectores de recarga, devido as diferenças entre os conectores utilizados nos Estados Unidos (principalmente o Tipo 1) e na Europa (principalmente o Tipo 2), o padrão CCS também acompanhou esta divergência, estando disponível nos modelos Combo Tipo 1 e Combo Tipo 2. Como pode ser observado na Figura 2.25, no Combo Tipo 1 a parte superior corresponde ao SAE J1772 e a parte inferior contém 2 entradas específicas para recargas rápidas em CC, enquanto no Combo Tipo 2 a parte superior corresponde ao padrão Mennekes. Alguns VEs que possuem este padrão de conexão são o GM Chevy Spark EV (Tipo 1), BMW i3 (Tipo 1 nos EUA e Tipo 2 na Europa) e Volkswagen e-Golf (Tipo 2) (CPFL ENERGIA, 2017d).

CCS Tipo 1 e Tipo 2



Figura 2.25 – Conector de recarga CCS Combo Tipo 1 (esquerda) e Tipo 2 (direita).
Fonte: Adaptado de CPFL Energia (2017d)

Por fim, a Tesla utiliza um padrão de conector de recarga próprio, desenvolvido para recargas rápidas e ultra rápidas, seja em CA ou CC, de até 250 kW (as primeiras versões eram limitadas a 135 kW), conforme mostrado na Figura 2.26. No entanto, a marca oferece adaptadores para o Tipo 1 e CHAdeMO, além de comercializar seus veículos no resto do mundo equipados com conectores CCS Tipo 2 (TAVARES, 2019).



Figura 2.26 – Conector de recarga Tesla.
Fonte: Tavares (2019)

2.3. Modelos de alocação para estações de recarga para veículos elétricos

No *status quo*, os ICEVs convencionais são abastecidos nos postos de combustível, que, na grande maioria dos países industrializados, existem em alto número e contam com uma boa rede de distribuição, garantindo aos motoristas a possibilidade de alcançar qualquer lugar acessível por estradas sem o risco de ficar sem combustível devido à distância viajada. Os BEVs, no entanto, possuem autonomia mais limitada quando comparados aos ICEVs (com poucas exceções), fazendo com que as viagens de longa distância exijam recargas, o que torna a disponibilidade de pontos de recarga algo essencial (BARESCH; MOSER, 2019).

A popularização dos VEs depende, invariavelmente, da instalação de uma infraestrutura adequada para sua recarga, de forma a tornar possível as viagens de longa distância sem que sejam necessários grandes desvios de rotas ou longos tempos de espera. Se as projeções de vendas esperadas para o mercado de VEs se concretizarem nos próximos cinco ou dez anos, a falta de infraestrutura de recarga pode se tornar um grande obstáculo para sua adoção em massa e comprometer a substituição dos combustíveis fósseis por eletricidade (NAPOLI *et al.*, 2020).

Devido aos grandes investimentos necessários para a implementação de uma infraestrutura de recarga adequada, que em tese só são justificados com uma alta demanda, atualmente ainda inexistente, o problema da recarga dos VEs pode ser comparado ao problema do surgimento do ovo ou da galinha, envolvendo três principais *stakeholders*: consumidores que não desejam comprar veículos que não podem ser recarregados, fabricantes que não desejam produzir veículos que não serão comprados e prestadores de serviço de recarga que não querem desenvolver uma infraestrutura de recarga para veículos que ainda não existem (MELAINA; BREMSON, 2008).

Graças a este cenário, existem na literatura muitos trabalhos relacionados ao problema de alocação e dimensionamento de infraestrutura de recarga para VEs, através de diferentes abordagens. De uma forma geral, um modelo de alocação se refere ao posicionamento de uma instalação em relação a uma demanda de usuários em uma área específica, podendo ser configurado para minimizar o número de instalações necessárias para cobrir toda a demanda (*set covering location model*) ou configurado para especificar o número de instalações para cobrir a demanda máxima (*maximal covering location model*) (HODGSON, 1990).

Baresch e Moser (2019) desenvolveram um modelo para prever a alocação de recargas de BEVs baseado em uma estrutura que leva em consideração dados demográficos e regras simples de decisão. O modelo foi aplicado a um estudo de caso levando em conta um conjunto de suposições e dados demográficos da Áustria e assumindo que os BEVs serão os VEs prevalentes como veículos de transportes de passageiros. Os resultados mostraram que aproximadamente 88% das recargas seriam conduzidas nas residências, 8,8% seriam conduzidas nos locais de trabalho, 1,7% das recargas seriam conduzidas em estações públicas e 1,5% em estações rápidas.

Já Liu *et al.* (2018) apresentaram um modelo para a alocação de ERVEs com base nos critérios de níveis de satisfação dos usuários com relação a distância entre as ERVEs e na integração entre fontes renováveis distribuídas. O modelo utiliza Sistemas Dinâmicos para definir os principais fatores de influência na alocação das ERVEs, além de levar em conta uma estrutura hierarquizada de um sistema de gerenciamento de energia das ERVEs para analisar as restrições em sua rede de distribuição. O modelo emprega a técnica de agrupamento K-médias para medir a localização e número de ERVEs e o grau médio de satisfação na recarga. Por fim, uma função objetivo realiza a simulação da alocação otimizada das ERVEs através do método de cálculo Algoritmo Genético de Otimização de Enxame de Partículas (GA-PSO), levando em consideração a integração com as energias renováveis. O modelo foi aplicado a um estudo de caso para uma rede de distribuição de um alimentador de testes com 33 nós da IEEE, onde calculou o número e localização adequada das ERVEs, os nós de acesso das fontes renováveis distribuídas e das ERVEs e a capacidade conectada de cada ERVE em kW.

Pan *et al.* (2020) desenvolveram um modelo de alocação de ERVEs do tipo rápida baseado nos padrões de direção existentes dos motoristas de forma a mantê-los o máximo possível e minimizar os desvios de rotas devido a necessidade de recarga. O modelo utiliza um processo determinístico de escolha de ERVE para simular os padrões de comportamento dos motoristas e propõe o uso de um modelo de alocação baseado nas atividades para encontrar a localização ótima das ERVEs públicas. Por fim, uma abordagem baseada em um algoritmo genético (GA) é desenvolvida para obter o resultado da otimização para o modelo de alocação. O modelo foi então aplicado a um estudo de caso para a área central da cidade de Pequim, usando dados de uma pesquisa obtidos em 2014. Os resultados mostraram que, em média, os motoristas de VEs realizam 11,7 viagens em 5 dias semanais, percorrendo 148,0 km e os VEs permanecem 97 horas estacionados. Além disto, os resultados mostraram que aumentar o número de ERVEs públicas do tipo rápida ocasiona na redução das perdas de viagens dos

motoristas de VEs. O mesmo acontece para o caso do aumento do número das ERVEs do tipo privada, instaladas nas residências dos proprietários de VEs.

Alhazmi, Mostafa e Salama (2017) elaboraram um modelo de alocação de ERVEs baseado na taxa de sucesso das viagens (TSR). O modelo foi dividido em duas partes, onde na primeira é feita a avaliação do comportamento das viagens feitas por VEs, seguida pelo modelamento da energia elétrica disponível na bateria no início das viagens. É feita então uma estimativa da área de cobertura de uma ERVE para cada nível de TSR, levando em consideração a aleatoriedade do comportamento dos motoristas e da energia disponível nas baterias. A segunda parte do modelo consiste na escolha do melhor conjunto de ERVEs através das estimativas realizadas para sua área de cobertura. O modelo foi formulado como um Problema de Localização de Cobertura Máxima (MCLP) e aplicado a diferentes redes de transportes, como urbanas e interurbanas, em diferentes estudos de caso. Os resultados obtidos mostraram que VEs com capacidade de bateria até 16 kWh são extremamente dependentes de ERVEs em rodovias para conseguirem uma boa performance em TSR. Já os VEs equipados com baterias de 54 kWh ou mais estão aptos a completarem 97% de todas as viagens em rodovias sem a necessidade de uma ERVE.

A questão do número e localização das ERVEs é abordada extensivamente na literatura. Porém, para o caso das rodovias e áreas interurbanas, os modelos desenvolvidos para este fim são menos recorrentes, com maiores dificuldades no uso de abordagens que relacionem as características reais dos veículos e dados de tráfego (NAPOLI *et al.*, 2020). Por este motivo, Napoli *et al.* (2020) apresentaram uma nova metodologia para alocar ERVEs em uma rede de rodovias, levando em consideração uma série de fatores relacionados às características dos VEs (autonomia e capacidade da bateria), do sistema rodoviário (fluxo de veículos), da infraestrutura de recarga (potência de recarga, disponibilidade diária, número de conectores) e do motorista (ansiedade de autonomia). A metodologia apresentada consiste na elaboração de um algoritmo que avalia uma rede de rodovias, dividindo-as em um conjunto de nós e *links* baseados em seus pontos de interesse, como grandes cidades, cabines de pedágio ou fronteiras. Através de um processo iterativo são realizadas análises de cada conjunto de nós e feita a alocação de áreas de serviço, sendo calculado na sequência o número necessário de ERVEs para atender ao fluxo de VEs daquele ponto. O modelo foi aplicado a um estudo de caso para a Itália, onde os resultados obtidos mostraram um mapa de pontos candidatos a alocação de áreas de serviço e respectivas ERVEs dividido por regiões (NAPOLI *et al.*, 2019).

2.4. Serviço de recarga para veículos elétricos no Brasil e no mundo

O avanço da mobilidade elétrica trouxe consigo a introdução de novos modelos de negócios no mercado, que vão desde adaptações de modelos tradicionais, orientados ao produto, como vendas de seguros, programas de financiamento e manutenção ou comercialização de dispositivos e equipamentos voltados para os VEs, até modelos mais focados no serviço, sejam orientados para o uso (como fornecimento de energia) ou orientados para o resultado (como *car sharing* e serviços de mobilidade) (LAFRANQUE, 2015).

O número de VEs que entra no mercado todos os anos cresce a taxas maiores do que o número de novas ERVEs do tipo rápida instaladas em rodovias e locais públicos. Isto faz com que haja uma grande lacuna a ser preenchida no mercado referente a instalação de novas áreas de serviço capazes de absorver esta demanda (CANNON, 2020). Para Lee e Clark (2018), as opções de recargas públicas serão cada vez mais convenientes e necessárias à medida em que BEVs com baterias de 70 a 100 kWh se tornem mais comuns no mercado, visto que recargas domésticas levariam um longo tempo para recarregá-los completamente. Os autores ainda afirmam que os proprietários de veículos convencionais não desejarão substituí-los por VEs se o processo de reabastecimento for mais difícil, lento ou incerto.

Lee e Clark (2018) argumentam ainda que as ERVEs públicas precisarão ser desenvolvidas em larga escala, sendo acessíveis para atender todos os modelos de VEs e necessitarão de planos de negócios viáveis, capazes de oferecer lucro aos seus investidores. De fato, nos países com mercados de VEs mais desenvolvidos, empresas privadas têm investido na prestação de serviço de recarga pública através da instalação de redes de ERVEs do tipo rápida (ou ultrarrápidas) espalhadas por diferentes regiões, sejam urbanas ou não urbanas, como é o caso da Chargemap (2020) e da Chargepoint (2020).

Para San Román *et al.* (2011), as ERVEs do tipo pública podem estar localizadas em áreas de estacionamento públicas ou privadas, acessadas por vários proprietários de VEs. O ponto de recarga pode pertencer a um Gerenciador do Ponto de Recarga ou a um Operador do Sistema de Distribuição e deve possuir uma interface ao usuário contendo algumas funções básicas, como identificação do usuário, acesso físico a conexão com o veículo, mensuração da energia recarregada, uma forma de pagamento e algum dispositivo de travamento após o pagamento. No caso das ERVEs instaladas em locais públicos, deve-se tomar o cuidado adicional de protegê-las contra ações de vandalismo.

Schroeder e Traber (2012) detalharam a composição de custos e receitas decorrentes da operação de uma ERVE do tipo pública. Os principais fatores que influenciam as receitas são a tarifa de recarga, a potência de recarga e a taxa de utilização das estações, que por sua vez depende do número de VEs e do comportamento dos motoristas. Já os custos são compostos de custo inicial do capital (CAPEX) e despesas operacionais (OPEX), que pode ser decomposto no custo da energia elétrica e nos custos de operação e manutenção (O&M). A Figura 2.27 demonstra a estrutura de despesas e receitas de uma ERVE do tipo pública.

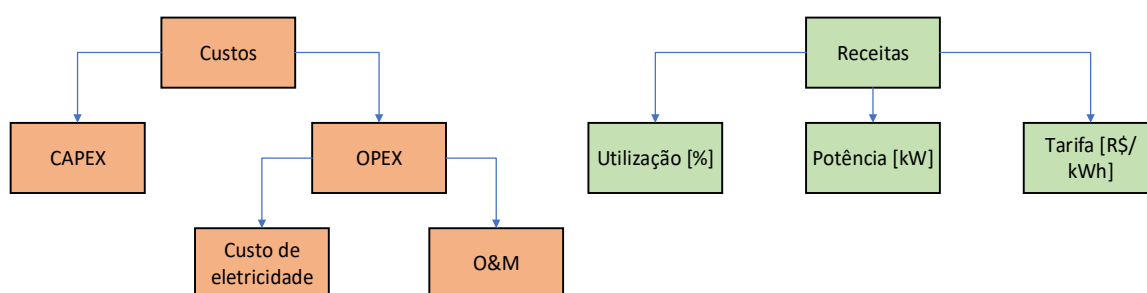


Figura 2.27 – Estrutura de custos e receitas de uma ERVE pública.
Fonte: Adaptado de Schroeder e Traber (2012)

Para Bland *et al.* (2020), o segmento de serviço de recargas de VEs possui grande potencial de exploração comercial, com investimentos estimados em 11 bilhões de dólares para os Estados Unidos até 2030, necessários para o desenvolvimento de cerca de 13 milhões de ERVEs. Para os autores, atividades de suporte à recarga de VEs, como serviços auxiliares para a rede de distribuição, oferta de fontes renováveis de energia e serviços de gerenciamento de energia, podem render até 15 bilhões de dólares em receitas anuais e economia de custos.

Bland *et al.* (2020) acreditam que as companhias que desejarem capturar as melhores oportunidades no mercado de recargas de VEs devem ofertar um conjunto completo de serviços, que contemple a integração entre hardware e software de forma a auxiliar os operadores de recarga a otimizar o uso da energia e do veículo através de informações de rota, intervalos de recarga, manutenção do veículo e disponibilidade das ERVEs. Deve contemplar ainda uma solução digitalizada, analítica e conectada, de forma a suportar as atividades através da cadeia de valor, desde o gerenciamento de informações até a comunicação com os clientes. Além disto, deve-se possuir uma larga rede de ERVEs instalada, com altas taxas de utilização. Por fim, as companhias devem ter acesso a sinais de preços de energia, o que poderá ajudar na otimização das decisões de compra de energia para recarga em tempo real, evitando os picos de preços da geração.

O Brasil deu seus primeiros passos no que se refere a prestação de serviços de recarga públicas através da regulamentação sobre recarga de VEs, como divulgado em Forbes (2018). A Resolução Normativa nº 819/2018, elaborada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), foi a primeira regulamentação sobre a recarga de VEs, permitindo que interessados na prestação desse tipo de serviço, sejam distribuidoras de energia, postos de combustíveis ou empreendedores, possam atuar no mercado. A ANEEL optou por uma regulamentação mínima do tema, garantindo que fossem evitadas interferências indesejáveis da atividade de recarga com a operação da rede elétrica e que as tarifas de energia elétrica não fossem impactadas pela prestação do serviço. Segundo a resolução, é permitido a qualquer interessado a realização de atividades de recarga de VEs, seja para fins de uso próprio ou para exploração comercial, a preços livremente negociados. A resolução permite ainda que as distribuidoras realizem a instalação de ERVEs em sua área de atuação destinadas à recarga pública (ANEEL, 2018a).

Após a regulamentação da atividade de recarga de VEs, diferentes projetos de instalação de infraestrutura de recarga pública têm sido promovidos por agentes públicos e privados, sejam eles montadoras de veículos, como divulgado por Redação Ciclo Vivo (2020), concessionárias de energia, divulgado por TN Sul (2020) ou mesmo consórcios formados por empresas do setor automotivo e elétrico, conforme Reis (2019). Segundo dados da IEA (2019b), até o final de 2018 o Brasil possuía apenas 5 ERVEs publicamente acessíveis do tipo rápida, além de 454 ERVEs do tipo lenta. A Figura 2.28 apresenta um comparativo dos dez países com o maior número de ERVEs públicas instaladas mais o Brasil para o ano de 2018, classificadas pelo tipo de recarga rápida ou lenta. A China se destaca como o país com o maior número de ERVEs públicas instaladas, com 275 mil unidades, seguida pelos Estados Unidos, com 54.500 unidades e pela Holanda, com 36.671 ERVEs.

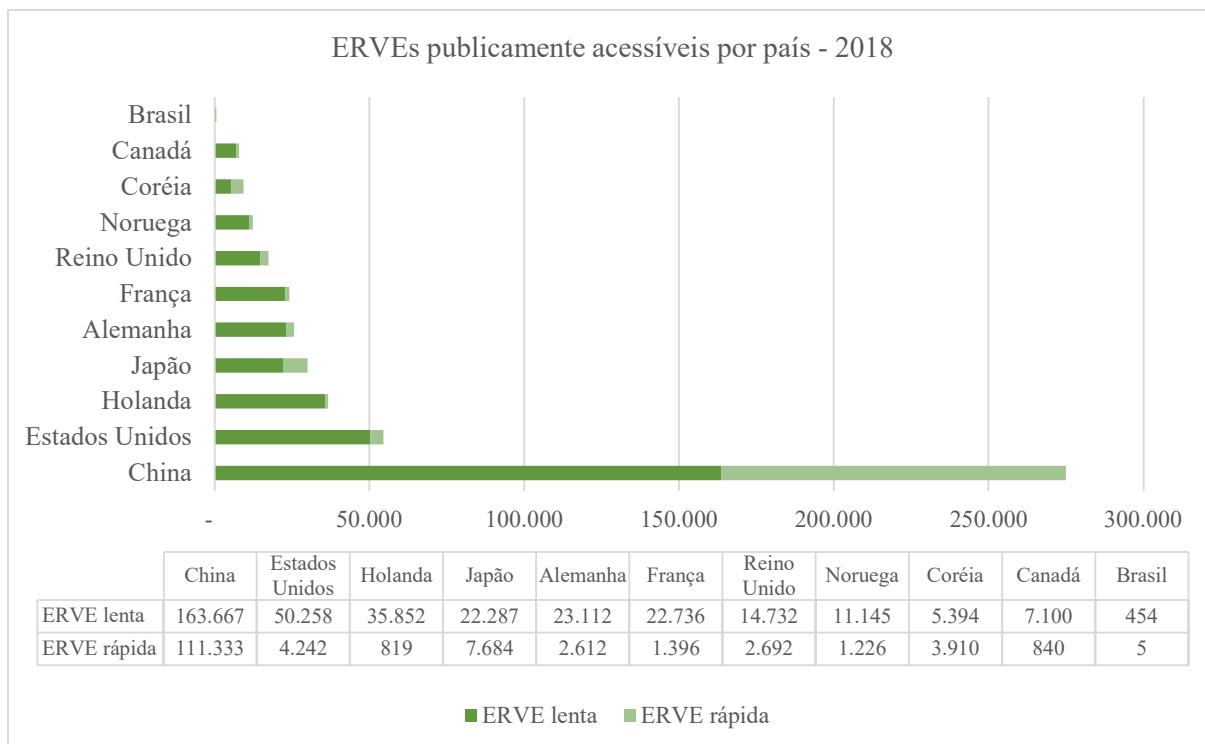


Figura 2.28 – ERVEs públicas instaladas por país em 2018.
Fonte: Elaborado a partir de IEA (2019b)

2.5. Arquitetura de recarga de veículos elétricos a partir de energia solar

Embora os VEs sejam considerados como o futuro do setor de transportes, graças a sua alta eficiência e ausência de emissões atmosféricas, eles somente serão sustentáveis caso a eletricidade utilizada para sua recarga seja gerada a partir de fontes renováveis. Por este motivo, o uso de energia solar destinada a recarga de VEs tem se destacado nos últimos anos, visto que possibilita que os VEs sejam recarregados com um combustível limpo e sustentável (CHANDRA MOULI, 2018).

Segundo Chandra Mouli (2018), existem dois benefícios principais relacionados a recarga de VEs a partir de sistemas fotovoltaicos (SFV), sendo benefícios econômicos e relacionados a sustentabilidade. Sob a perspectiva de ciclo de vida e rendimento energético, recarregar os VEs a partir de energia solar resulta em uma eficiência mais alta, além de emissões de GEE muito menores (ou nulas) e menores impactos ambientais. Sob o ponto de vista econômico, com a queda dos preços dos SFV, o preço da eletricidade fotovoltaica (FV) já é mais barata do que a eletricidade gerada pelas fontes convencionais em muitas partes do mundo.

Isto faz com que, dependendo do tipo de VE, seu custo total para o proprietário seja mais barato do que o custo total de um ICEV convencional.

Segundo Fachrizal *et al.* (2020), a crescente integração entre os VEs e os SFVs oferece novos desafios para os sistemas de distribuição de energia, que geralmente não foram projetados para lidar com grandes volumes de energia proveniente de geração distribuída intermitente e recargas de VEs não controladas, podendo inclusive levar ao colapso de sua operação. Com o aumento da quantidade de energia gerada pelos SFVs e das recargas de VEs, é provável que a curva de carga futura experimente grandes variações, como demonstrado no exemplo da Figura 2.29, onde é apresentado um sistema de distribuição residencial com grandes parcelas de FV e VE. Por este motivo, é provável que novas estratégias de gerenciamento de sistemas de potência sejam necessárias para suportar o aumento da participação dos sistemas FV e das recargas de VEs.

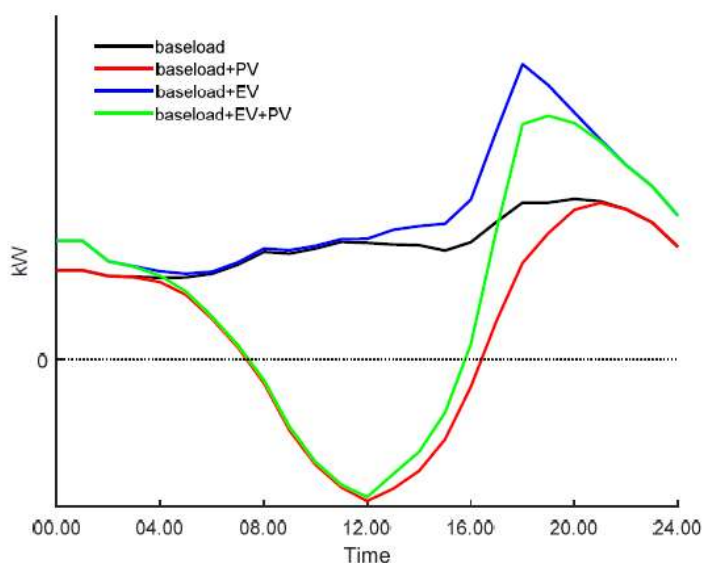


Figura 2.29 – Curvas de carga líquida típicas em diferentes cenários em rede de distribuição residencial com participação de FV e VE.
Fonte: Fachrizal *et al.* (2020)

A curva de carga líquida demonstrada na Figura 2.29 também é conhecida como curva do pato, caracterizada pela queda acentuada da carga líquida no período próximo ao meio-dia, no momento de geração máxima dos SFV. Segundo Castro *et al.* (2018), a curva do pato refere-se à possibilidade de uma grande parcela da carga ser atendida pela geração distribuída fotovoltaica na metade do dia, o que implica em uma redução da oferta de outras fontes geradoras de energia no sistema elétrico, podendo obrigar o operador do sistema a efetuar o desligamento de usinas com baixa flexibilidade de operação. Este fenômeno também exige uma

retomada de carga rápida conforme a geração FV diminui e se aproxima o pico de carga, o que acontece, normalmente, entre 17 horas e 20 horas. Essa retomada requer usinas flexíveis e fontes de armazenamento para lidar com o rápido aumento da demanda.

Já para o caso das recargas públicas de VEs, as ERVEs possuem curvas de carga que dependem exclusivamente do padrão de comportamento dos usuários de VEs. A adoção de esquemas de *smart charging and discharging* em ERVEs através do gerenciamento da frota de VEs conectada às mesmas pode permitir que os VEs ofereçam melhores serviços, como serviços anciliares para os operadores do sistema de distribuição e transmissão ou o serviço de armazenamento de energia renovável, o que pode aumentar suas receitas. Isto pode ser obtido com o uso de energia renovável solar, visto que, recentemente, as ERVEs equipadas com SFVs têm se tornado mais comuns. O acoplamento entre estas duas tecnologias pode aumentar a performance técnica, econômica e ambiental dos VEs, reduzindo as perdas durante a recarga e as emissões *well-to-wheel* (FACHRIZAL *et al.*, 2020).

Para McLaren (2014), a combinação entre os SFVs e VEs pode permitir a superação dos desafios individuais de ambas as tecnologias. O uso das recargas controladas, realizadas de forma sincronizada com a produção de energia dos SFVs ocasiona o aumento do benefício de ambas. Isto permite o uso otimizado do SFV de forma a suavizar a curva de carga causada pelo carregamento diurno dos VEs e pode reduzir a necessidade de manter ligados os geradores térmicos que atuam como reserva operacional para os SFVs, contribuindo para a substituição da geração a partir de fontes fósseis.

Por fim, Chandra Mouli (2018) afirma que recarregar os VEs a partir de SFVs alimentados em uma rede CC apresenta vantagens, devido aos seguintes motivos:

- Tanto os VEs quanto as UFVs operam com corrente contínua por natureza;
- A recarga em CC torna o *smart charging* possível, onde a recarga dos VEs pode ser variada ao longo do tempo;
- A recarga de VEs em CC facilita os protocolos de V2G.

A recarga de VEs a partir de energia solar pode ser feita a partir de diferentes arquiteturas de sistema. Todas elas possuem em comum a integração entre o conjunto de placas fotovoltaicas, a ERVE e a rede de distribuição CA. Dois tipos diferentes de conversores de potência podem ser utilizados para integrar o SFV, o VE e a rede de distribuição: um conversor multiportas (MPC) que integre todos os sistemas ou conversores de potência separados para cada sistema que estejam interconectados. Através destes dois tipos de conversores de potência,

pode-se obter quatro tipos de arquiteturas de sistema, descritas a seguir, com base no barramento de interligação ser em CA (monofásico ou trifásico) ou CC (CHANDRA MOULI, 2018).

2.5.1. Arquitetura 1

Esta arquitetura utiliza conversores separados para os painéis fotovoltaicos e para a recarga e descarga dos VEs. O conversor FV é um inversor de frequência CC/CA equipado com um *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) e o conversor de recarga do VE é um conversor CA/CC. A rede de distribuição CA atua como a espinha dorsal da arquitetura e toda a transferência de potência do sistema passa por ela. A principal desvantagem deste tipo de sistema é que a potência das placas fotovoltaicas não pode ser usada diretamente na recarga dos VEs, o que resulta em uma conversão CC/CA – CA/CC desnecessária. A Figura 2.30 mostra o esquema deste tipo de arquitetura.

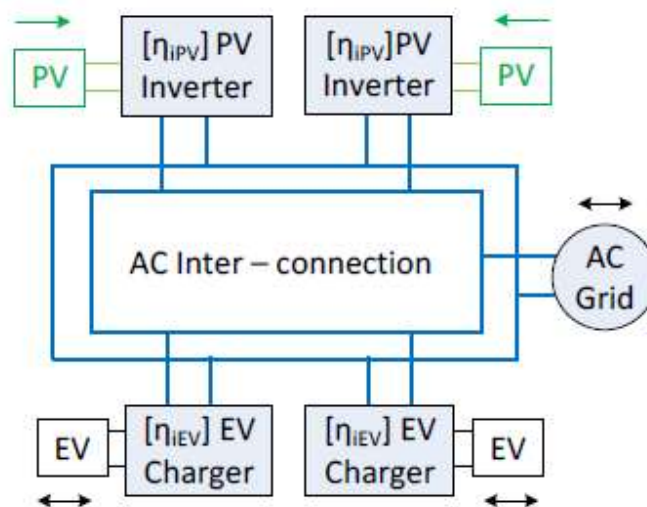


Figura 2.30 – Arquitetura de sistema nº1 para recarga VE-FV.
Fonte: Chandra Mouli (2018)

2.5.2. Arquitetura 2

Nesta arquitetura os conversores de potência do SFV e do VE também são independentes e utiliza-se uma rede de conexão CC para a interligação entre o conversor do SFV, o VE e a rede de distribuição. Os conversores do SFV e do VE são ambos conversores

CC/CC equipados com controle MPPT e controle de recarga, respectivamente. A rede de interligação CC facilita o uso direto da potência CC gerada pelo SFV na recarga do VE, resultando em uma maior eficiência. A conversão da potência CC para a CA é feita através de um inversor de frequência central conectado à rede de distribuição, que permite a operação de V2G e o fluxo de potência da rede CA para o sistema (quando a demanda de recarga do VE é maior do que a geração FV) e vice-versa (quando a demanda de recarga do VE é menor do que a geração FV).

A principal desvantagem deste tipo de arquitetura é que a rede de interligação CC deve ser construída separadamente, em vez de se utilizar a rede CA já existente. A Figura 2.31 demonstra o esquema desta arquitetura.

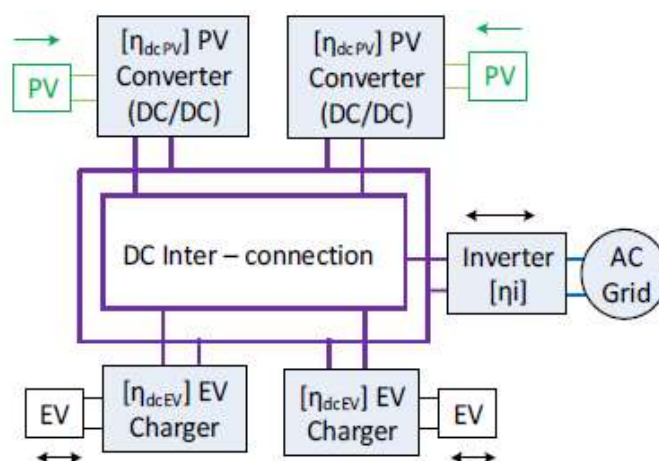


Figura 2.31 – Arquitetura de sistema nº2 para recarga VE-FV.
Fonte: Chandra Mouli (2018)

2.5.3. Arquitetura 3

Este tipo de arquitetura utiliza um MPC, como mostrado na Figura 2.32. O MPC conecta o conversor para as placas FV, o VE e a rede de distribuição CA através de um *link* central em CC, conforme detalhado na Figura 2.33. Vários MPCs podem ser conectados uns aos outros através da rede CA. O uso dos MPCs resulta em uma maior densidade de potência, menor número de componentes, redução dos custos e maior facilidade no controle. Além disto, o controle da recarga do VE pode ser obtido através do controlador do MPC. A desvantagem deste tipo de arquitetura é que a potência CC gerada por um conjunto de placas FV conectadas a um MPC não pode ser utilizada para recarregar um VE conectado a outro MPC sem uma conversão CA/CC.

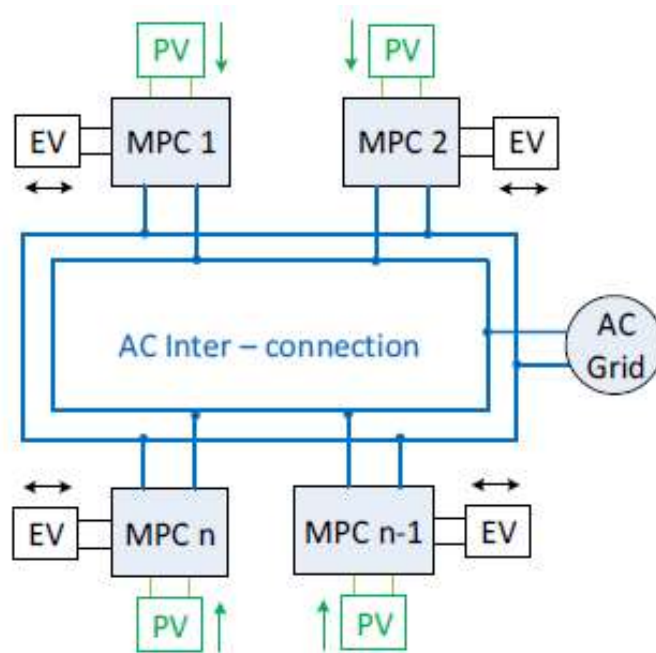


Figura 2.32 – Arquitetura de sistema nº3 para recarga VE-FV.
Fonte: Chandra Mouli (2018)

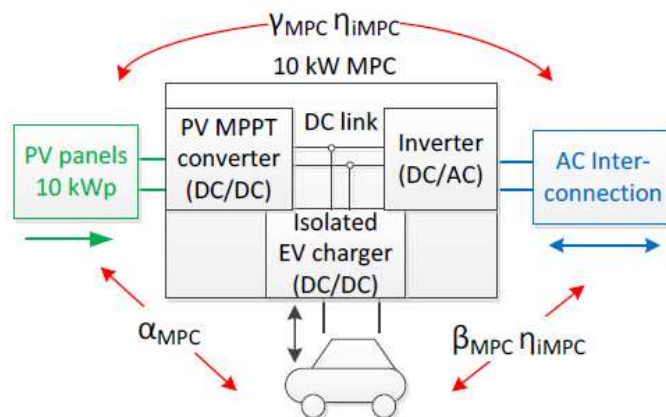


Figura 2.33 – Diagrama de blocos de um MPC para arquitetura de sistema nº3.
Fonte: Chandra Mouli (2018)

2.5.4. Arquitetura 4

O último tipo de arquitetura de sistema citado por Chandra Mouli (2018) utiliza um MPC para integrar os conversores para o arranjo FV e o VE, além de uma rede CC que permite a interconexão entre vários MPCs diferentes, como pode ser observado na Figura 2.34. Um inversor de frequência central é usado para conectar o sistema a rede de distribuição CA, o que é uma solução melhor do que o uso de vários pequenos inversores embutidos no MPC da

arquitetura 3. Da mesma forma que na arquitetura 2, a rede CC pode ser expandida para uma micro rede, dependendo da potência desejada e de outras cargas ou fontes de energia que possam ser conectadas. A Figura 2.35 apresenta o diagrama de blocos do MPC utilizado nesta arquitetura.

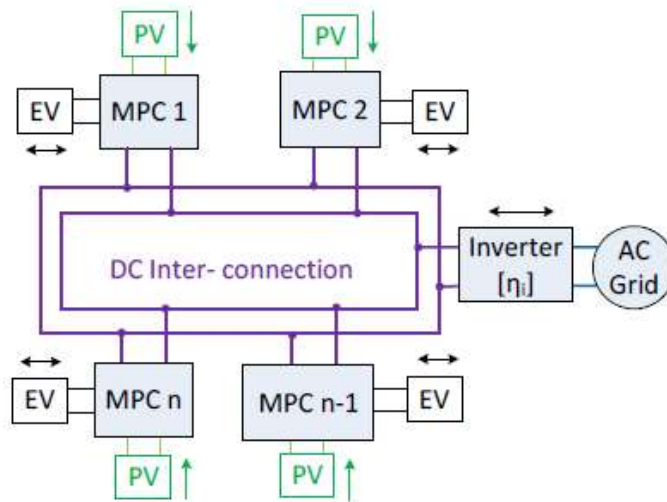


Figura 2.34 – Arquitetura de sistema n°4 para recarga VE-FV.
Fonte: Chandra Mouli (2018)

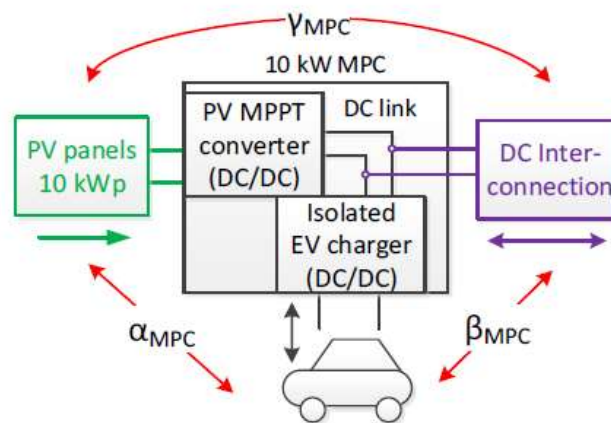


Figura 2.35 – Diagrama de blocos de um MPC para a arquitetura de sistema n° 4.
Fonte: Chandra Mouli (2018)

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGIA

A metodologia desenvolvida neste trabalho pode ser dividida em três etapas. A Figura 3.1 mostra um fluxograma do modelo desenvolvido para esta finalidade.

- Determinação do fluxo de VEs circulantes na rodovia Fernão Dias em 2030.
- Determinação do número de ERVEs necessárias e sua alocação ao longo da rodovia.
- Dimensionamento das UFVs para o atendimento das ERVEs.

O primeiro passo desta metodologia consistiu em estimar o tráfego de VEs circulantes no ano de 2030 na rodovia BR-381. Para isto, foram coletados dados históricos referentes a frota circulante de veículos no Brasil, a frota de VEs registrados no Brasil, ao tráfego pedagiado na rodovia BR-381, ao Produto Interno Bruto e a população brasileira no período de 2009 a 2018. Estes dados foram utilizados em dois modelos, modelo de DGS e modelo de Bass, respectivamente, sendo o primeiro responsável pela projeção da frota circulante de veículos no Brasil para 2030 e o segundo responsável pelo nível de participação da frota de VEs na frota circulante. Foram elaborados três cenários através do modelo de Bass, sendo os cenários Base (participação máxima de 5%), Moderado (participação máxima de 10%) e Acelerado (participação máxima de 25%). Com base na relação existente entre os dados de tráfego de veículos pedagiados na Fernão Dias e a frota circulante nacional foi determinado o tráfego diário de VEs na rodovia Fernão Dias para 2030, levando em consideração as frotas dos estados por onde passa a rodovia, São Paulo e Minas Gerais, respectivamente, além de um fator de segurança referente aos veículos de outros estados.

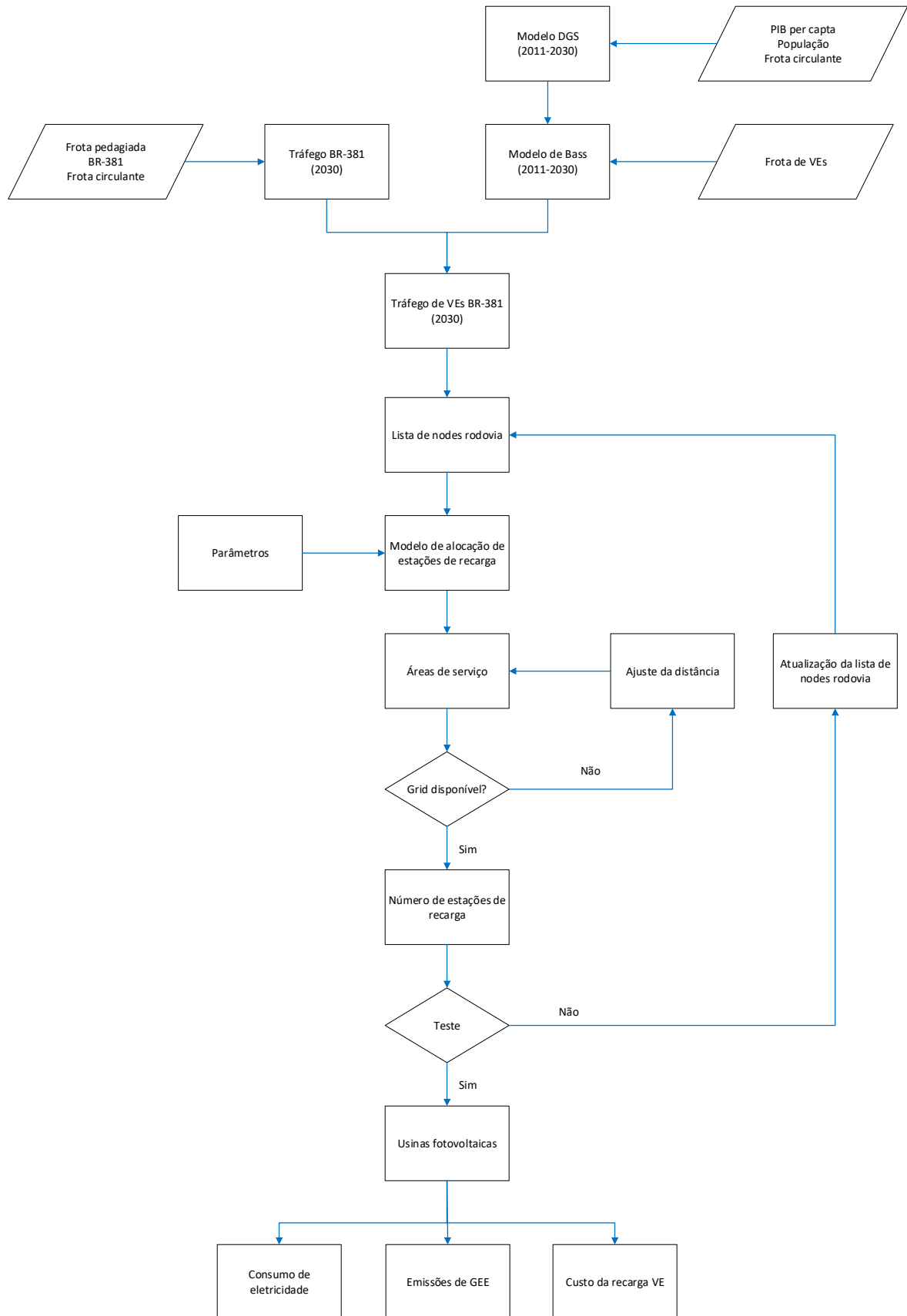


Figura 3.1 – Fluxograma com metodologia proposta.

O segundo passo desta metodologia consistiu em determinar, para cada cenário, a localização e quantidade das ERVEs destinadas aos VEs, de acordo com os fluxos diários obtidos na etapa anterior, com as características dos VEs disponíveis no mercado brasileiro e com as características da rodovia BR-381. Para isto foi utilizada a metodologia proposta em Napoli *et al.* (2020). Foi criada uma lista com os *nodes* primários e secundários relacionados aos pontos de interesse na rodovia e encontrados os fluxos de veículos projetados para cada trecho, conforme critérios definidos no subtítulo 3.2. Para cada *node* foi feita a avaliação da distância entre as áreas de serviço necessárias para abrigar as ERVEs, com base em parâmetros definidos para o respectivo *node*.

De acordo com os resultados obtidos pelo modelo de alocação das áreas de serviço, foi feita uma avaliação da disponibilidade da rede de distribuição elétrica nas proximidades. Se a rede de distribuição elétrica não estava disponível, foi feito um ajuste reduzindo a distância entre as áreas de serviço e uma nova avaliação, até que a área de serviço seja alocada próxima a uma rede elétrica disponível com capacidade para atender a demanda das ERVEs.

Após validação dos locais das áreas de serviço, o modelo calculou a quantidade de ERVEs necessárias para atender ao fluxo de VEs projetado para a respectiva área de serviços. O *node* posterior (ou conjunto de *nodes* posteriores) à área de serviços alocada é removido da lista: se a lista fica vazia o processo de alocação de áreas de serviço termina, caso contrário, o processo é repetido para o próximo *node*.

Com o número de ERVEs definido e, conseqüentemente, a quantidade de energia elétrica consumida diariamente para a recarga da frota de VEs circulantes na rodovia Fernão Dias, foram dimensionadas, também para cada cenário, as UFVs necessárias para a recarga, através do software PVSystTM.

De posse dos resultados do dimensionamento das UFVs necessárias foram mensurados os impactos no consumo de eletricidade e emissão de gases de efeito estufa, ambos relacionados à recarga dos VEs realizada com energia solar fotovoltaica. Para a avaliação do impacto nas emissões de gases de efeito estufa, foram utilizados os dados e metodologia descritos em Ministério do Meio Ambiente (2014).

Por fim, foi feita uma análise de viabilidade econômica com dados de mercado para determinação da tarifa a ser cobrada pela recarga dos veículos na rodovia já citada, levando em consideração uma taxa interna de retorno mínima definida em 10%.

3.1. Tráfego diário de veículos elétricos na rodovia Fernão Dias

Para a projeção do tráfego diário de VEs na rodovia Fernão Dias foram utilizados dois modelos de projeção, modelo de DGS e modelo de Bass, respectivamente, como proposto no estudo realizado em Baran e Legey (2013), além da adoção de algumas suposições referentes ao tráfego de veículos na rodovia, detalhadas adiante.

O modelo de DGS foi desenvolvido em Dargay, Gately e Sommer (2007) para estimar o nível de saturação da frota de veículos de um determinado país, levando em consideração sua frota de veículos, população e respectiva renda per capita. A solução do modelo é expressa pela Equação (1):

$$V_t = \gamma_i \cdot \theta \cdot e^{\alpha \cdot \beta_i \cdot GDP_t} + (1 - \theta)V_{t-1} \quad (1)$$

Onde,

V_t – Frota per capita no instante t ;

γ_i – Nível de saturação, em termos de veículos por 1.000 habitantes, do país i ;

θ – Velocidade de ajuste do nível de motorização de acordo com o crescimento da renda, sendo $0 < \theta < 1$;

α – Parâmetro de curvatura que determina o valor da função de Gompertz nos níveis mais baixos de renda;

β – Parâmetro de curvatura correspondente ao nível de renda de cada país para qual o nível máximo de saturação γ_{\max} de 831 veículos por 1.000 habitantes é atingido.

GDP_t – *Gross Domestic Product*, Produto Interno Bruto per capita do país no instante t .

Os dados referentes a população brasileira foram obtidos através do portal Cidades@ do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), disponível em IBGE (2020), assim como a projeção para o crescimento da população entre 2019 a 2030. Os dados de PIB per capita entre 2009 a 2018 foram obtidos em The World Bank (2019). A projeção do PIB per capita foi realizada levando em consideração o crescimento previsto na nota técnica Cenário Econômico para os Próximos Dez Anos (2020-2029), divulgada pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), disponível em EPE (2019b).

Embora tenham sido determinados os coeficientes para o caso do Brasil em Dargay, Gately e Sommer (2007), diferentemente do que foi adotado por Baran e Legey (2013), optou-se por realizar o ajuste dos coeficientes α e β através do método dos mínimos quadrados, conforme a série de dados históricos referentes a frota circulante de veículos no período de 2009 a 2018. Foram utilizados os dados da frota circulante divulgados pelo Sindicato Nacional da Indústria de Componentes para Veículos Automotores, disponível em Sindipeças (2019).

A Tabela 3.1 apresenta os coeficientes ajustados conforme dados históricos da frota circulante. A Figura 3.2 apresenta a curva da frota circulante projetada até 2030.

Tabela 3.1 – Parâmetros para o modelo de DGS.

Parâmetro	Valor
α	-18,85
β	-0,23
γ	831
θ	0,095
V_0	137,9
t_0	2010

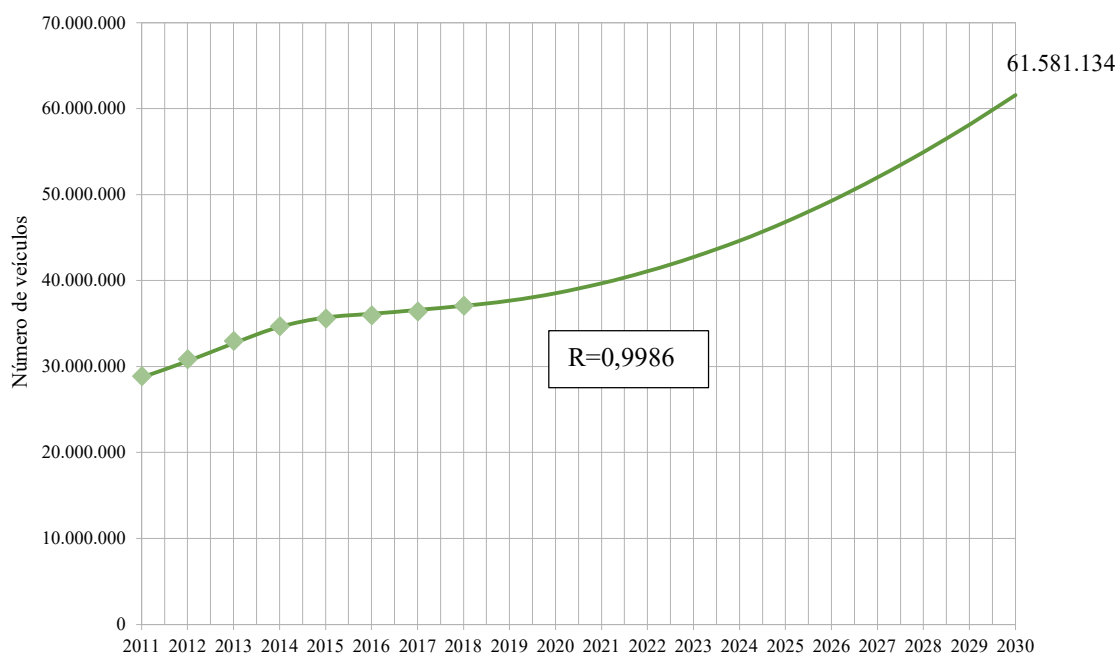


Figura 3.2 – Frota circulante projetada para 2030.

Para a determinação do nível de participação dos VEs no mercado automobilístico nacional foi utilizado o modelo de Difusão de Bass, conforme descrito em Bass (1969). Bass

propôs um modelo de difusão de vendas de novos produtos, onde é assumido que o momento da compra inicial de um consumidor está relacionado ao número de compradores anteriores. Os compradores são separados em duas categorias: os inovadores, que adquirem o produto em questão nos primeiros estágios após seu lançamento e os imitadores, que o adquirem em função da compra prévia pelos inovadores.

A solução para o modelo de Difusão de Bass é expressa pela Equação (2).

$$F(t) = \frac{1 - e^{-(p-q)t}}{1 + \frac{q}{p}e^{-(p+q)t}} \quad (2)$$

Onde,

$F(t)$ – Fração acumulada do mercado potencial que adotou o produto até o instante t ;

p – Coeficiente de inovação;

q – Coeficiente de imitação.

O número acumulado de adotantes até o instante t é dado por:

$$A(t) = MF(t) \quad (3)$$

Onde:

$A(t)$ – Número acumulado de adotantes do produto;

M – Mercado potencial.

Os parâmetros p e q foram ajustados através do método dos mínimos quadrados, conforme os dados históricos da frota de VEs, disponível em Anfavea (2019). Como os VEs são um produto sem similar no mercado nacional e contam com uma série histórica extremamente curta, a taxa de penetração dos VEs na frota nacional ao longo do tempo envolve grandes incertezas. Por este motivo, neste estudo foram propostos 3 cenários considerando diferentes porcentagens de mercado potencial: cenário Base (M igual a 5%), Moderado (M igual a 10%) e Acelerado (M igual a 25%).

A Tabela 3.2 apresenta os coeficientes ajustados para cada cenário de penetração. A Figura 3.3 apresenta a frota projetada do cenário básico ajustada conforme dados históricos,

enquanto a Figura 3.4 apresenta a frota projetada de VEs para os três cenários. A tabela completa com os dados de frota projetada para cada cenário pode ser visualizada no Anexo A.

Tabela 3.2 – Parâmetros para modelo de Difusão de Bass.

Parâmetro	M5%	M10%	M25%
p	0,00000573	0,00000278	0,00000112
q	0,477	0,479	0,479

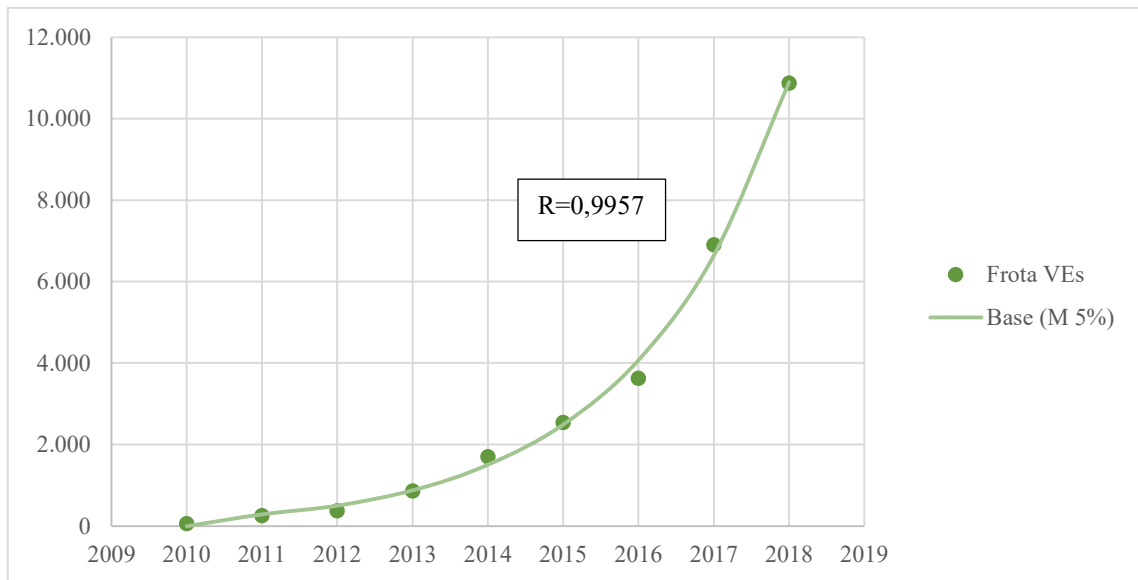


Figura 3.3 – Ajuste dos parâmetros do modelo de Bass.

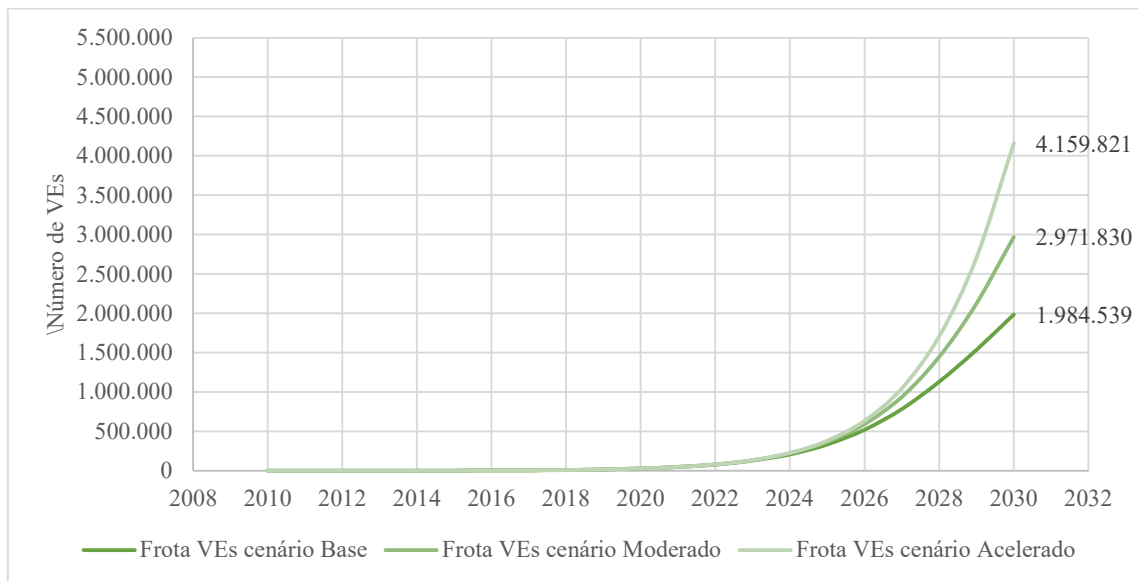


Figura 3.4 – Cenários de projeção para frota de veículos elétricos em 2030.

A rodovia federal BR-381 é uma das principais rodovias do Brasil, com extensão de aproximadamente 1200 quilômetros e atravessa os estados de São Paulo, Minas Gerais e Espírito Santo (MAXTON, 2018). O trecho Fernão Dias, a principal ligação entre as cidades de São Paulo e Belo Horizonte, foi concedido pelo governo federal à administradora Arteris S/A em 2008. A rodovia conta com oito praças de pedágio, por onde trafegam, em média, 250 mil veículos por dia (ARTERIS S/A, 2020). A Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) disponibilizou um conjunto de dados referentes ao tráfego mensal contabilizado nas 8 praças de pedágio do trecho Fernão Dias, nos dois sentidos de fluxo, para o período de 2009 a 2019, conforme ANTT (2020). Foi estabelecida a razão média entre o tráfego anual em cada praça de pedágio e a frota circulante brasileira para o período de 2009 a 2019, conforme Equações (4) e (5). Adicionalmente, é assumido que esta relação será mantida para o período 2020-2030. As tabelas completas com os dados históricos e projetados podem ser visualizadas nos Anexos B e C.

$$m = \frac{\sum_i^n \left(\frac{Tr_i}{Fc_i} \right)}{n} \quad (4)$$

$$Tr_{pj} = m \cdot Fc_{pj} \quad (5)$$

Onde,

m – Fator de projeção para tráfego anual;

Tr_i – Tráfego anual por praça de pedágio no ano i ;

Fc_i – Frota circulante no ano i ;

Tr_{pj} – Tráfego anual projetado por praça de pedágio no ano j ;

Fc_{pj} – Frota circulante projetada no ano j .

Para a determinação do tráfego diário de VEs na rodovia Fernão Dias foram adotadas as seguintes considerações:

- Por se tratar de uma rodovia interestadual, foram considerados na frota de VEs que circularia pela rodovia os veículos dos estados de São Paulo e Minas Gerais, com uma margem de segurança adicional de 10% referente a possibilidade de tráfego de veículos de outros estados. Para isto, foi utilizada a porcentagem da frota circulante referente aos dois estados, disponível em Sindipeças (2019).

- A participação dos VEs na frota circulante para cada cenário para o ano 2030 foi aplicada ao tráfego diário projetado na rodovia.

- Os tráfegos mensais disponíveis em ANTT (2020) foram divididos pelo número de dias de cada mês, para determinação dos tráfegos diários.

A Tabela 3.3 apresenta o tráfego diário projetado de VEs por praça de pedágio e sentido de fluxo para o ano de 2030.

Tabela 3.3 – Fluxos projetados diários de veículos elétricos na rodovia Fernão Dias por cenário em 2030.

Sentido Norte	Base			Moderado			Acelerado		
	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo
T1 - Mairiporã	747	799	945	1.119	1.196	1.415	1.567	1.674	1.981
T2 - Vargem	287	320	428	430	479	641	602	671	897
T3 - Cambuí	180	206	294	270	309	441	377	433	617
T4 - São G. Sapucaí	104	122	184	155	182	276	217	255	386
T5 - Carmo da Cachoeira	113	135	204	169	201	305	237	282	427
T6 - Santo Ant. do Amparo	100	117	179	149	176	268	209	246	376
T7 - Carmópolis de Minas	102	120	180	153	180	270	214	252	377
T8 - Itatiaiuçu	129	149	209	193	223	312	270	311	437
Sentido Sul	Base			Moderado			Acelerado		
	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo
T1 - Mairiporã	761	807	859	1.139	1.209	1.286	1.595	1.692	1.800
T2 - Vargem	290	319	379	434	478	567	608	669	794
T3 - Cambuí	182	207	276	273	310	414	382	434	579
T4 - São G. Sapucaí	151	171	228	226	256	342	316	358	478
T5 - Carmo da Cachoeira	111	132	194	167	198	291	233	277	407
T6 - Santo Ant. do Amparo	97	115	166	146	172	249	204	241	349
T7 - Carmópolis de Minas	100	118	169	149	176	254	209	247	355
T8 - Itatiaiuçu	126	147	194	189	219	290	265	307	406

3.2. Alocação de estações de recarga

Napoli *et al.* (2020) desenvolveram um modelo para estimar o número de ERVEs e determinar sua alocação correta em uma rede de rodovias. O modelo leva em consideração a energia armazenada nos VEs, sua correlação com a potência da ERVE e o tráfego de VEs, além de considerar o componente psicológico do motorista. A rede de rodovias é representada por uma figura gráfica dividida em *nodes* e *links*, onde os *nodes* são classificados em primários (grandes cidades e pontos peculiares, como fronteiras nacionais) e secundários (outros pontos relevantes, como praças de pedágio ou acessos a outras rodovias).

A Figura 3.5 apresenta uma representação gráfica da rodovia Fernão Dias, contemplando seus dois sentidos de circulação. Os quadrados escuros indicam os *nodes* primários, que representam cidades importantes ao longo da rodovia. Já os círculos escuros indicam os *nodes* secundários e representam outros pontos relevantes, como cabines de pedágio e fronteiras. Por fim, a figura apresenta a distância correspondente em quilômetros entre os *nodes* e uma lista dos *nodes* e suas respectivas localizações. Os *nodes* secundários identificados como cabines de pedágio pertencem a concessionária Arteris S/A, onde é feita a contabilização dos fluxos de veículos disponíveis em ANTT (2020).

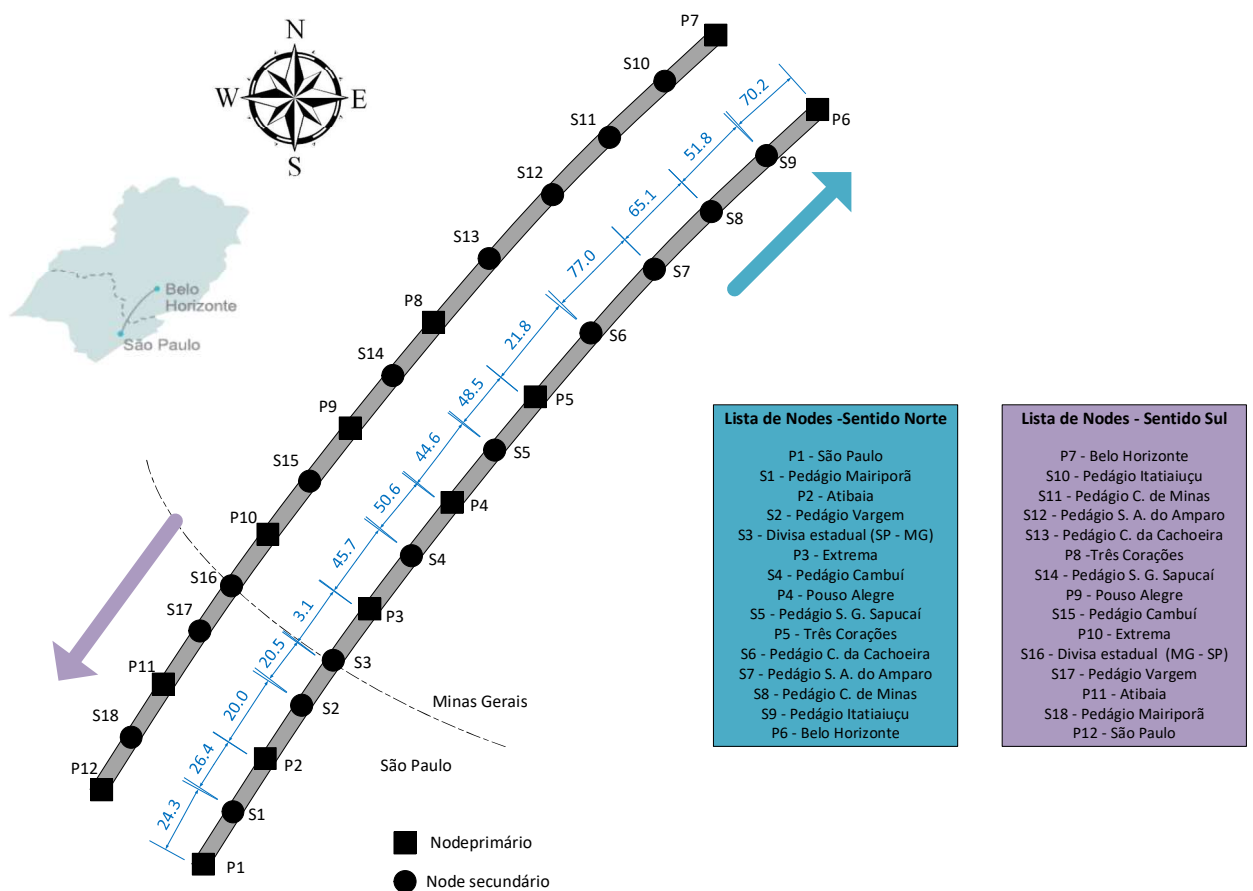


Figura 3.5 – Representação gráfica da rodovia Fernão Dias.

Embora os fabricantes de VEs informem a autonomia esperada de seus veículos, em condições reais de funcionamento estes valores podem ser menores do que o esperado, devido ao aumento de consumo em trechos de aclive, como mostrado nos testes realizados em Martins *et al.* (2013). Por este motivo, a alocação das áreas de serviço é feita com base na autonomia dos veículos e em um parâmetro de ansiedade de autonomia, descrito como o medo de ficar preso em uma viagem devido a uma bateria descarregada (YUAN *et al.*, 2018), que atua como

um fator de segurança em relação a autonomia real dos VEs. Testes práticos realizados por Franke e Krems (2013) mostraram que os motoristas de VEs sentem-se confortáveis em utilizar de 75% a 80% da autonomia de seus veículos. Dadas estas condições, conforme apresentado em Napoli *et al.* (2020), a distância entre duas áreas de serviço é avaliada como na Equação (6).

$$d_{pq} = \rho_a \cdot r_v \quad (6)$$

Onde,

d_{pq} – Distância entre duas áreas de serviço p e q (km);

ρ_a – Fator de ansiedade de autonomia;

r_v – Autonomia dos veículos (km).

O número de ERVEs (χ_p) para cada área de serviço é dado pela Equação (7).

$$\chi_p = \left[\left(\frac{\alpha_l}{\gamma} \right) \cdot \left(\frac{f_l}{N_p} \right) \right] \quad (7)$$

Onde,

χ_p – Número de ERVEs;

α_l – Fator de amplificação;

γ – Número de conectores de recarga;

f_l – Fluxo médio de veículos no *link l* (veículos / dia);

N_p – Número de VEs que podem ser recarregados diariamente em cada conector da ERVE.

O termo α_l é um fator de amplificação para o *link l* dado por:

$$\alpha_l = \frac{f_l^r}{f_l^m} \quad (8)$$

Onde,

f_l^r – Fluxo máximo de veículos no *link l* no período de referência;

f_l^m – Fluxo médio de veículos no *link l* no período de referência.

O número de veículos que podem ser recarregados N_p é dado pela Equação (9).

$$N_p = \varphi_d \left(\frac{P_{station}}{E_{av}} \right) \quad (9)$$

Onde,

φ_d – Duração do dia em horas;

$P_{station}$ – Potência da ERVE (kW);

E_{av} – Energia do sistema de baterias do veículo (kWh).

Para a determinação dos parâmetros relacionados as características técnicas dos veículos (E_{av} e r_v) foi feita uma média ponderada dos valores de capacidade do sistema de baterias e autonomia com respeito ao número de VEs registrados no Brasil. Os dados de registro de VEs da base de dados do Denatran foram processados pelo Fórum Veículos Elétricos e Mobilidade Elétrica (2020) e classificados por fabricante e modelo comercial. Estes dados foram utilizados para o levantamento dos dados de autonomia, capacidade do sistema de baterias e potência máxima de recarga. Foram considerados apenas os dados dos veículos puramente elétricos, com possibilidade de recarga em potências iguais ou superiores a 22 kW e que possam trafegar em rodovias, como em Napoli *et al.* (2019). A Tabela 3.4 sintetiza estes dados, assim como as referências de onde os dados técnicos foram retirados.

Os valores usados para os parâmetros da metodologia proposta por Napoli *et al.* (2020) estão listados na Tabela 3.5.

A Tabela 3.6 apresenta as áreas de serviço alocadas conforme a metodologia apresentada e o número de ERVEs definido para cada área de serviço por cenário. Devido ao fato de a rodovia Fernão Dias ser uma importante rota que liga todo o Mercosul ao Nordeste do Brasil (SOARES; RODRIGUES; MELO, 2018), com possibilidade de tráfego de veículos de outros estados, optou-se por alocar uma área de serviços nos pontos de partida para cada sentido de fluxo, de forma a garantir a recarga completa dos VEs no início do trajeto pela rodovia. As demais áreas de serviço em cada sentido de fluxo foram alocadas conforme a distância d_{pq} , desde que no local definido existisse rede de distribuição elétrica disponível. Como pode ser observado nas Equações 7 e 9, os fluxos médios de VEs em cada área de serviços são diários, levando em conta que as áreas de serviço operam 24 horas por dia. Desta forma, o modelo considera que os fluxos médios de VEs em cada área de serviço são divididos pelo período de

24 horas, o que implica na utilização das ERVEs em 100% do tempo disponível. Além disto, as áreas de serviço SV1 e SV6 contam com um número maior de ERVEs, devido aos fluxos projetados de VEs serem maiores na região da cidade de São Paulo, conforme a série histórica de frota pedagiada.

Tabela 3.4 – Características técnicas dos veículos puramente elétricos registrados no Brasil.

Fabricante	Modelo	Qtde	Eav [kWh]	Rv [km]	Pot máx [kW]	Referência
ANHUI/NEON	IEV 6E	4	41	320	60	(EV COMPARE, 2020)
BMW	I3 BEV	5	18,8	160	50	(NAPOLI <i>et al.</i> , 2019)
BMW	I3 BEV 120AH	27	33,2	245	50	(NAPOLI <i>et al.</i> , 2019)
BYD	E5	43	51,2	405	60	(EV COMPARE, 2020)
BYD	E6	30	80	400	50	(EV COMPARE, 2020)
CAOA Cherry	ARRIZO 5 E	130	49	351	60	(EV COMPARE, 2020)
Chevrolet	BOLT	10	60	380	80	(EV COMPARE, 2020)
JAC	IEV 40	63	40	300	22	(JAC MOTORS, 2020)
Jaguar	IPACE	104	90	480	100	(EV COMPARE, 2020)
KIA	SOUL EV	1	30	210	100	(EV COMPARE, 2020)
Mitsubishi	I-MIEV	7	16	160	50	(EV COMPARE, 2020)
Nissan	LEAF	49	40	378	50	(NAPOLI <i>et al.</i> , 2019)
Nissan	LEAF 1a Geração	34	24	200	50	(NAPOLI <i>et al.</i> , 2019)
Renault	FLUENCE ZE	24	22	185	50	(NAPOLI <i>et al.</i> , 2019)
Renault	ZOE 22 kWh	31	22	240	50	(NAPOLI <i>et al.</i> , 2019)
Renault	ZOE 41 kWh	143	41	400	50	(NAPOLI <i>et al.</i> , 2019)
Smart	SMART ELETRIC DRIVE	6	17,6	160	22	(NAPOLI <i>et al.</i> , 2019)
Tesla	MODEL 3	16	75	530	250	(EV COMPARE, 2020)
Tesla	MODEL S 70 kWh	4	70	420	105	(EV COMPARE, 2020)
Tesla	MODEL S 100 kWh	7	100	632	120	(EV COMPARE, 2020)
Tesla	MODEL X 75 kWh	2	75	417	120	(EV COMPARE, 2020)
Tesla	MODEL X 90 kWh	1	90	489	120	(EV COMPARE, 2020)
Tesla	MODEL X 100 kWh	5	100	565	120	(EV COMPARE, 2020)

Tabela 3.5 – Parâmetros para modelo de alocação de estações de recarga.

Parâmetro	Valor
Ansiedade de autonomia (ρ)	0,8
Autonomia (r_v)	364
Bateria (E_{av})	50,43
Conectores (γ)	2
Duração do dia (φ)	24
$P_{station}$	50

Para a determinação da existência da rede de distribuição nos locais selecionados, foram feitas consultas com os distribuidores locais através de seus canais de atendimento, disponíveis em Enel (2020a) e Cemig (2020a). Conforme informado pelas distribuidoras, os locais escolhidos para a alocação das áreas de serviço possuem capacidade para a conexão à rede de

distribuição elétrica, não sendo necessários ajustes nas distâncias de alocação das respectivas áreas de serviço.

Tabela 3.6 – Localização das áreas de serviço e número de estações de recarga por cenário.

ID	Node	Sentido	Distância [km]	Descrição	Estações de recarga		
					Base	Moderado	Acelerado
SV1	P1	Norte	0	São Paulo	20	30	42
SV2	P5	Norte	287,2	Três Corações	4	6	8
SV3	P6	Norte	282,4	Belo Horizonte	4	7	9
SV4	P7	Sul	0	Belo Horizonte	4	6	9
SV5	P8	Sul	287,2	Três Corações	4	6	9
SV6	P12	Sul	282,4	São Paulo	18	27	38

Para fins de estudo desta dissertação, foi assumido que cada área de serviços onde será alocada uma ERVE possui infraestrutura suficiente para seu funcionamento (existem vagas de estacionamento suficientes, possibilidade de acesso à rodovia, áreas para descanso dos passageiros, etc.).

3.3. Usinas fotovoltaicas para abastecimento das estações de recarga

Para o dimensionamento das UFVs responsáveis pelo abastecimento das ERVEs foram adotadas as seguintes considerações:

- As áreas de serviço localizadas na mesma cidade são abastecidas por UFVs alocadas dentro da mesma área de cobertura do distribuidor local de energia elétrica.
- As UFVs operam conectadas a rede elétrica com participação no SCEE regulamentado pelas Resoluções Normativas 482/2012 e 687/2015 da ANEEL, na modalidade de autoconsumo remoto. Os créditos de energia gerados pelas UFVs são compensados nas respectivas áreas de serviço dentro da mesma região.
- As UFVs são dimensionadas para atender completamente a demanda anual de energia elétrica das ERVEs, de forma a minimizar os custos referentes a recarga dos VEs.
- As áreas de serviço e as UFVs fazem parte do grupo A, modalidade tarifária azul, conforme subgrupo definido por sua tensão de alimentação, disponível em ANEEL (2010).

- As ERVEs escolhidas são do modelo EFACEC QC45, modelo já utilizado em postos de recarga rápida instalados em rodovias brasileiras, e possuem rendimento mínimo de 0,94, conforme informado por ABVE (2018b) e Electricmobility (2020).

O consumo diário de energia elétrica destinado a recarga dos VEs por área de serviços é dado pela Equação (10).

$$Ec_{sa} = \frac{(E_{av} \cdot f_l^m \cdot \chi_p)}{\eta_{cs}} \quad (10)$$

Onde,

Ec_{sa} – Energia elétrica consumida diariamente na recarga dos VEs (kWh);

η_{cs} – rendimento da ERVE.

O SCEE é definido como um sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração distribuída ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa dessa mesma unidade consumidora ou de outra unidade consumidora de mesma titularidade da unidade consumidora onde os créditos foram gerados, desde que possua o mesmo Cadastro de Pessoa Física (CPF) ou Cadastro de Pessoa Jurídica (CNPJ) junto ao Ministério da Fazenda (ANEEL, 2012a).

Silva *et al.* (2020) explica como é feita a compensação da energia elétrica através do balanço entre a medição da energia consumida e da energia gerada e posterior recebimento de créditos quando o valor consumido é menor do que o valor gerado. Além disto, é demonstrado como é estruturada a tarifa de energia e o procedimento aplicável para a compensação de créditos sobre o consumo de energia no período de ponta, quando estes são gerados a partir de energia injetada no período fora de ponta, através de um fator de ajuste.

Conforme estabelecido por ANEEL (2012b) para obter o acesso ao sistema de compensação de energia elétrica, uma minigeração distribuída pode ter potência máxima instalada de 5 MW. Além disto, ANEEL (2015) descreve a modalidade de autoconsumo remoto, caracterizada por unidades consumidoras de mesma titularidade jurídica, onde a micro ou minigeração distribuída está localizada em local diferente das unidades consumidoras, porém dentro da mesma área de concessão. Nesta modalidade, os créditos excedentes da microgeração ou minigeração distribuída podem ser compensados na unidade consumidora.

As UFVs localizadas na região metropolitana de São Paulo, dentro da área de cobertura da distribuidora de energia ENEL, atendem as áreas de serviço SV1 e SV6. As UFVs localizadas em Três Corações atendem as áreas de serviço SV2 e SV5. Por fim, as UFVs que atende as áreas de serviço SV3 e SV4 estão localizadas na região metropolitana de Belo Horizonte. As UFVs de Três Corações e Belo Horizonte estão localizadas dentro da área de cobertura da distribuidora de energia CEMIG. Os fatores de ajuste para a compensação de créditos de energia no horário de ponta, provenientes de geração de energia em horário fora de ponta, para as distribuidoras ENEL e CEMIG são 1,67 e 1,66, respectivamente, conforme Enel (2020b) e Cemig (2020b).

A distribuidora de energia CEMIG desenvolveu uma ferramenta online para informar a disponibilidade de conexão à rede de distribuição para novos empreendimentos fotovoltaicos de geração distribuída, conforme divulgado em Cemig (2020c). Através de consulta realizada no portal, verificou-se a disponibilidade de conexão das UFVs instaladas no estado de Minas Gerais, conforme disponível em Cemig (2020d). Para as UFVs localizadas no estado de São Paulo, o contato foi realizado via canal de atendimento ao cliente, disponível em Enel (2020a), onde foi confirmada a possibilidade de conexão à rede.

A Figura 3.6 mostra a consulta realizada para as UFVs localizadas na cidade de Três Corações. O quadrado amarelo representa a subestação Três Corações 2, com capacidade total de 25.000,00 kW e tensão nominal de 13,8 kV. O círculo azul representa a distância elétrica de 6 quilômetros de raio desde a subestação consultada, onde pode ser instalada a UFV. O ponto de localização representa o local escolhido para a instalação das UFVs das áreas de serviço SV2 e SV5.

software PV SystTM para uma UFV de 5 MW de potência CA pode ser encontrado no Anexo D.

Tabela 3.7 – Usinas fotovoltaicas destinadas as áreas de serviço.

Área de serviço	Localização	Distribuidora	Usinas fotovoltaicas para áreas de serviço [MW]		
			Base	Moderado	Acelerado
SV1	São Paulo	ENEL	11,5	16,9	23,6
SV2	Três Corações	CEMIG	1,3	1,8	2,5
SV3	Belo Horizonte	CEMIG	1,8	2,7	3,7
SV4	Belo Horizonte	CEMIG	1,8	2,7	3,7
SV5	Três Corações	CEMIG	1,4	2,0	2,8
SV6	São Paulo	ENEL	11,6	17,0	23,9

Os relatórios gerados pelo PV SystTM fornecem duas informações importantes referentes à área ocupada pelas UFVs, sendo a primeira delas a área total dos módulos, em m², e a taxa de ocupação do terreno, dada em função da distância entre *sheds*. Estes dados foram levados em consideração para a determinação da área mínima necessária, dada em hectares (ha), para a instalação de cada UFV, como pode ser observado na Figura 3.7.

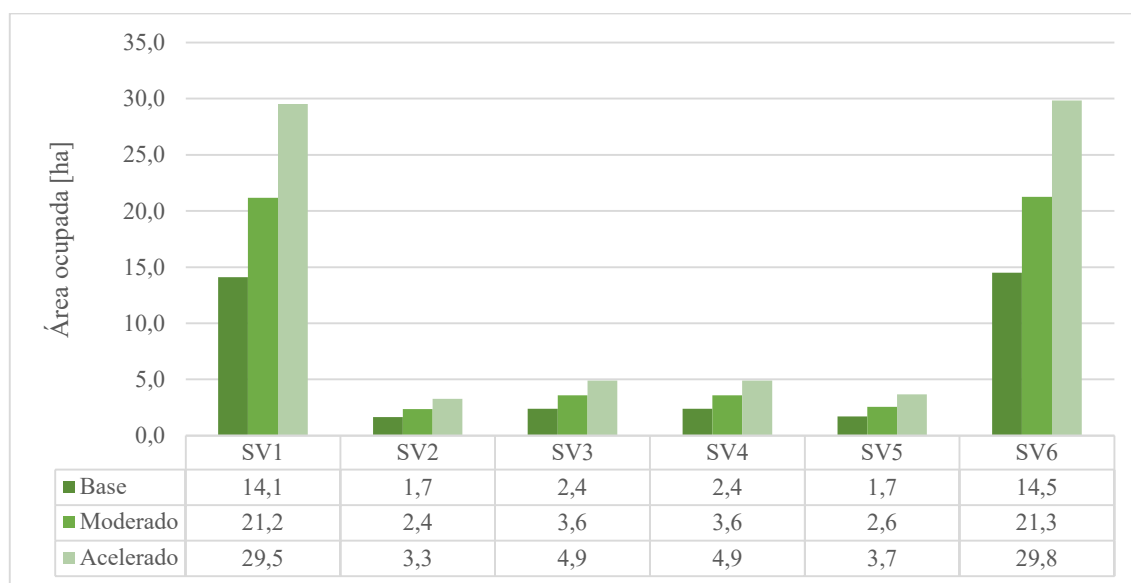


Figura 3.7 – Área ocupada por UFVs.

A Figura 3.8 apresenta uma representação da área que seria ocupada por uma UFV de 30 hectares, destinada ao fornecimento de energia para as áreas de serviço SV1 ou SV6, identificada pelo retângulo de contorno branco. Como pode-se perceber na figura, existe muito espaço disponível às margens da rodovia BR-381, embora não necessariamente as UFVs devam

estar localizadas próximas as áreas de serviço, mas sim apenas dentro da mesma área de concessão da distribuidora de energia.

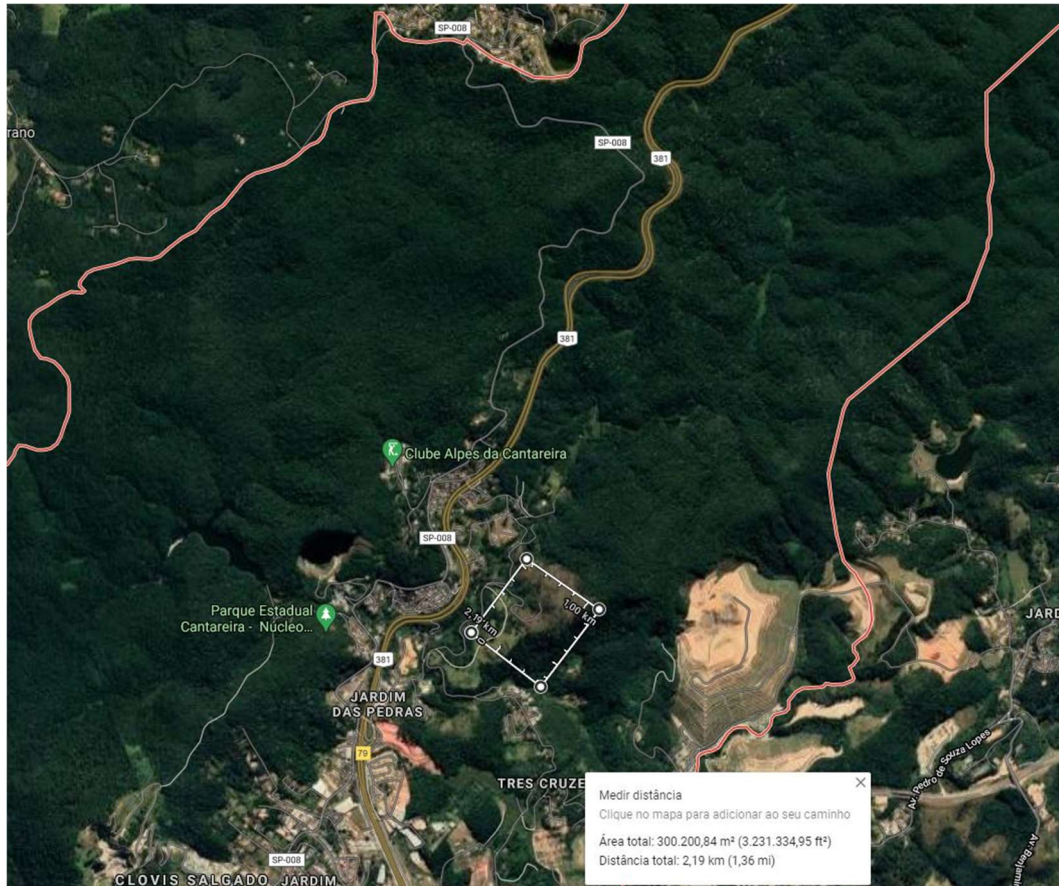


Figura 3.8 – Possível localização de UFV de 30 ha para atendimento de SV1 ou SV6 cenário Acelerado.
Fonte: adaptado de Google Maps (2020).

3.4. Emissões de gases de efeito estufa

O setor de transportes brasileiro foi responsável pela emissão de 192,7 Mt de CO₂ em 2018, totalizando 46,3% de todas as emissões de CO₂ no país no mesmo ano (EPE, 2019c). Muitos países tem implementado políticas públicas e programas de incentivo com o objetivo de reduzir as emissões de CO₂ no setor de transportes, conforme Council of the European Union (2020) e European Commission (2020). A utilização dos VEs em conjunto com a geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis tem sido apontada como uma opção promissora para atingir as metas de redução de emissão de CO₂ impostas na Europa e em outros países (EUROPEAN COMMISSION, 2018).

O Ministério do Meio Ambiente (2014) divulgou uma metodologia para o cálculo das emissões veiculares no cenário brasileiro. O relatório aponta uma série de poluentes que são provenientes do escapamento de veículos automotores. De forma geral, a Equação (11) pode ser utilizada para a determinação das emissões provenientes da frota circulante num determinado ano calendário.

$$E = Fr. Iu. Fe \quad (11)$$

Onde,

E – Taxa anual de emissão do poluente considerado (g/ano);

Fe – Fator de emissão do poluente considerado ($g_{\text{poluente}}/\text{km}$);

Fr – Frota circulante de veículos;

Iu – Intensidade de uso do veículo (km/ano).

Os fatores de emissão apontados no relatório são expressos em termos de massa por km percorrido e a intensidade de uso é expressa em quilometragem anual percorrida. Além disto, os fatores de emissão de CO₂ considerados no relatório para o uso de etanol não levam em conta a reabsorção do dióxido de carbono emitido no processo de crescimento da cana-de-açúcar.

Conpet (2020) divulgou, através do Programa Brasileiro de Etiquetagem, uma lista com 1034 modelos e versões de veículos novos comercializados no Brasil, provenientes de 36 marcas diferentes. Este catálogo apresenta informações sobre emissão de poluentes, sendo Óxidos de Nitrogênio (NO_x), Hidrocarbonetos não Metano (NMHC) e Monóxido de Carbono (CO), gases de efeito estufa, especificamente o Dióxido de Carbono (CO₂), valores de quilometragem por litro em rodovias e cidades, além do consumo energético, tipo de combustível e uma classificação do veículo conforme sua performance obtida em testes. Os fatores de emissão apontados no relatório são obtidos a partir de testes, assim como a quilometragem por litro, obtida sob condições padrões de laboratório, conforme NBR-7024.

Para o caso específico das emissões evitadas pelo uso de VEs na Fernão Dias, em vez de considerar a intensidade de uso e os fatores de emissão apontados em Ministério do Meio Ambiente (2014), foram considerados os valores apontados em Conpet (2020) com os seguintes ajustes:

- Para a determinação da frota circulante foram considerados os fluxos médios projetados de VEs em cada cabine de pedágio.

- Para a determinação da distância percorrida pelos veículos foram levadas em consideração as distâncias entre as praças de pedágio distribuídas ao longo da rodovia.
- Os fatores de emissão para CO₂, NO_x, NMHC e CO foram obtidos a partir dos valores médios. Estes fatores correspondem aos valores obtidos em ensaio para veículos novos. Por se tratar de uma projeção para 2030, espera-se que estes fatores de emissão sejam menores no futuro.
- Para a determinação do tipo de veículo a ser substituído, foram consideradas as porcentagens relativas aos modelos novos disponíveis em 2020, no que diz respeito aos motores tipo flex fuel, gasolina, etanol e diesel. Tais porcentagens foram aplicadas a frota circulante projetada para 2030. De uma maneira geral, existe uma tendência na substituição de veículos puramente a gasolina por veículos flex fuel no Brasil, como projetado em EPE (2018b), o que reduziria as emissões totais de carbono de origem fóssil da frota circulante devido ao uso do etanol hidratado.
- No caso específico dos veículos de tecnologia flex fuel, para a determinação das parcelas de gasolina e etanol utilizadas, foi aplicada a relação entre os combustíveis consumidos no transporte rodoviário brasileiro no ano de 2018, disponível em EPE (2019c). Essa proporção foi aplicada a frota de veículos flex fuel de 2030.
- As emissões de CO₂ referentes aos veículos movidos a etanol foram desconsideradas por não serem provenientes de origem fóssil. Esta abordagem é reforçada por Conpet (2020), que considera que o fator de emissão de CO₂ de veículos a etanol igual a zero. As emissões de gases poluentes evitadas pelo uso dos VEs na Fernão Dias para 2030 é dada pela Equação (12).

$$E_p = \sum_i^n (Fr_{ji} \cdot Fe_j \cdot d) \quad (12)$$

Onde,

E_p – Taxa anual de emissão do poluente considerado (t/ano);

Fr_{ji} – Frota circulante de veículos com combustível j que trafega pela cabine de pedágio

i ;

Fe_j – Fator de emissão do poluente considerado ($g_{\text{poluente}}/\text{km}$) para veículos com combustível j ;

d – Distância percorrida pela frota circulante até a cabine de pedágio i .

O uso de energia solar fotovoltaica para o abastecimento dos VEs na Fernão Dias ocasiona um benefício indireto na redução das emissões de CO₂. A operação dos SFVs é totalmente livre de emissões de dióxido de carbono, metano, óxidos de enxofre e óxidos de nitrogênio (CO₂, CH₄, SO_x e NO_x, respectivamente), conforme apontado por Tawalbeh *et al.* (2021). A energia elétrica gerada a partir das UFVs destinadas ao abastecimento das áreas de serviço substitui, até certo ponto, a geração de outras fontes participantes do Sistema Interligado Nacional (SIN), como citado por Castro *et al.* (2018). A quantidade de energia substituída pela geração das UFVs pode ser proveniente de uma usina que emita GEE. Neste caso, uma quantidade de CO₂ deixaria de ser emitida.

Segundo Castro *et al.* (2018), uma abordagem rápida para a determinação das emissões de CO₂ evitadas pelo uso dos SFVs por megawatt-hora consiste em levar em consideração o fator de emissão de CO₂ do SIN, que leva em conta a média de emissões de todo o parque gerador. Uma abordagem similar também é proposta por Constantino *et al.* (2018), que avaliou os impactos na redução de emissões de GEE por SFVs instalados na região nordeste do Brasil.

Em 2018, foram emitidos 88 kg de CO₂ por MWh gerado em energia elétrica (EPE, 2019c). A Equação (13) permite calcular a quantidade anual que seria emitida de CO₂ pelo setor de geração de eletricidade para abastecer os VEs circulantes na Fernão Dias, caso as UFVs não fossem utilizadas. De forma aproximada, esta quantidade pode ser considerada como as emissões de CO₂ evitadas pelo uso das UFVs.

$$E_{ar} = \sum_i^{365} E_{ge} \cdot E_{c_{sa}} \quad (13)$$

Onde,

E_{ar} – Emissão de CO₂ evitada na recarga de VEs com o uso das UFVs (t CO₂/ano);

E_{ge} – Fator de emissão de CO₂ na matriz energética brasileira (t CO₂/MWh);

$E_{c_{sa}}$ – Energia consumida na recarga dos veículos por área de serviço (MWh/dia).

3.5. Custo da recarga dos veículos elétricos na Fernão Dias

Para a determinação do custo de recarga a ser cobrado nas áreas de serviço, foi utilizada a técnica de Fluxo de Caixa Descontado. Salvo *et al.* (2017) afirma que este é um método de avaliação que permite a simulação de todo o ciclo de vida, desde a data da aquisição até o final de seu ciclo de vida, sendo capaz de avaliar seu valor atual descontando o fluxo de caixa anual esperado. Os fluxos de caixa anuais esperados são derivados da diferença entre as receitas e as despesas operacionais, geradas durante o ciclo de vida do bem ou serviço.

Um projeto de investimento convencional apresenta desembolsos e recebimentos. Para haver retorno sobre o capital investido, é necessário que o total das entradas de caixa superem as saídas. Desta forma, admitida uma taxa de juros mínima aceitável, denominada Taxa Mínima de Atratividade (TMA), o projeto terá condições de ser aceito, se o Valor Presente Líquido (VPL) do fluxo de caixa não for negativo (BARBIERI; ÁLVARES; MACHLINE, 2007).

A Taxa Interna de Retorno (TIR) é definida como a taxa de juros à qual o Valor Presente Líquido de todos os fluxos de caixa (positivos e negativos) de um projeto ou investimento é igual a zero. Quanto maior for a TIR, maior potencial de retorno um projeto possui. A TIR é uma importante ferramenta de tomada de decisões em um projeto e está frequentemente associada com a avaliação de viabilidade ou lucratividade de um projeto de investimento (BREWER; PICUS, 2016). Este indicador é dado pela Equação (14).

$$0 = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1 + IRR)^t} \quad (14)$$

Onde,

CF_t – Fluxo de caixa no período t ;

IRR – Taxa interna de retorno.

Neste estudo, a técnica de fluxo de caixa descontado foi utilizada para avaliar a implementação da solução completa para a recarga de veículos, contemplando a área de serviços com suas ERVEs e sua(s) respectiva(s) UFV(s). Para a definição da taxa interna de retorno aceitável para o investimento, foi levada em consideração a taxa básica de juros da economia no Brasil, SELIC, com meta definida pelo Banco Central em 3,0% a.a. (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2020). Desta forma, foi arbitrada uma TIR mínima aceitável como critério de viabilidade para o investimento em 10,0% e encontrado qual seria o custo mínimo do MWh recarregado em cada área de serviços relacionado com esta taxa.

Para a determinação dos fluxos de caixa referentes a cada área de serviços nos três diferentes cenários, foi considerado CAPEX referente a aquisição das ERVEs e UFVs, com suas respectivas instalações. Já o OPEX contempla os custos de operação das áreas de serviço, sendo aqueles que se referem diretamente a manutenção e operação das ERVEs e UFVs.

Sobre o CAPEX, os valores das UFVs foram considerados a partir de pesquisa de mercado realizada por Greener Estratégia e Pesquisa (2019). Os custos apresentados contemplam a aquisição dos kits fotovoltaicos e o serviço de integração, que envolvem engenharia, mão de obra de instalação, impostos e margem de lucro, totalizando o preço final para o cliente. Os custos das ERVEs modelo EFACEC foram obtidos através de contato realizado com empresa atuante no setor de mobilidade elétrica, com a Associação Brasileira dos Proprietários de Veículos Elétricos Inovadores e com um representante do fabricante, estimados em R\$ 200.000,00 por equipamento (ABRAVEI, 2020; ELECTRICUS, 2020; ZEEV, 2019). Além disto, foram levados em consideração os custos de instalação propostos em Nicholas (2019), de acordo ao número de estações instaladas em cada área de serviço e com o valor do câmbio do dólar americano em R\$ 5,43, referente a 1º de maio de 2020, disponível em Morningstar (2020). Tais custos tendem a diminuir no futuro devido ao fator de escala, portanto esta é uma abordagem conservadora.

Por outro lado, sobre o OPEX, as despesas relacionadas as UFVs foram consideradas a partir do levantamento realizado pela Greener, disponível em Greener Estratégia e Pesquisa (2020). O estudo apresenta informações reais de uma UFV de grande porte, com despesas de 1,29% do CAPEX. Para a determinação do OPEX das áreas de serviço, foram considerados os valores estimados por Ducharme e Kargas (2016), no total de \$1.500,00 por ERVE. Além disso, foi considerado o valor da tarifa de eletricidade consumida e demanda de potência contratada tanto para as áreas de serviço quanto para as UFVs pertencentes a respectiva área de serviços, conforme valores definidos em Enel (2020b) e Cemig (2020b).

A Tabela 3.8 relaciona os valores de CAPEX e OPEX para cada área de serviços nos três cenários propostos.

Tabela 3.8 – CAPEX e OPEX por área de serviço.

Área de serviço	CAPEX			OPEX		
	Base	Moderado	Acelerado	Base	Moderado	Acelerado
SV1	R\$ 52.841.351,20	R\$ 77.902.026,80	R\$ 108.654.837,52	R\$ 4.246.983,99	R\$ 6.244.921,15	R\$ 8.793.331,81
SV2	R\$ 5.919.768,00	R\$ 8.497.152,00	R\$ 11.686.536,00	R\$ 727.524,00	R\$ 1.054.406,86	R\$ 1.155.285,03
SV3	R\$ 8.061.768,00	R\$ 12.080.844,00	R\$ 16.341.228,00	R\$ 877.848,91	R\$ 1.111.026,16	R\$ 1.461.406,56
SV4	R\$ 8.098.856,00	R\$ 11.863.152,00	R\$ 16.341.228,00	R\$ 876.324,97	R\$ 1.011.593,59	R\$ 1.458.533,96
SV5	R\$ 6.109.856,00	R\$ 9.109.152,00	R\$ 13.128.228,00	R\$ 750.793,86	R\$ 1.104.894,16	R\$ 1.301.542,92
SV6	R\$ 51.178.456,00	R\$ 75.237.684,00	R\$ 105.512.296,00	R\$ 4.104.192,61	R\$ 6.149.656,61	R\$ 8.596.147,95

Desta forma, foram montados os fluxos de caixa descontados para cada área de serviços para os três cenários elaborados. As receitas brutas são provenientes da prestação do serviço de recarga dos VEs com base no MWh recarregado, conforme previsto em ANEEL (2018b). Foram ainda considerados os seguintes tributos referentes a prestação de serviços de recarga: PIS/COFINS de 3,65%, ISS de 2,00%, IR de 8,00% e Contribuição Social de 2,88%. Os fluxos de caixa projetados possuem período previsto de 20 anos. Um exemplo detalhado do fluxo de caixa descontado, referente a área de serviço SV1 para o cenário Base pode ser encontrado no Anexo E.

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com as projeções estabelecidas neste estudo, os cenários Base, Moderado e Acelerado representariam, em 2030, uma participação dos VEs de 3,22%, 4,83% e 6,75% da frota circulante nacional, respectivamente. Deste total, o número de VEs que circularia pela rodovia Fernão Dias, contabilizado em cada posto de pedágio, e que necessitaria de recarga, é mostrado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Fluxos projetados de veículos elétricos na rodovia Fernão Dias em 2030.

Sentido Norte	Base			Moderado			Acelerado		
	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo
T1 - Mairiporã	272.655	291.635	344.925	408.435	436.540	516.475	571.955	611.010	723.065
T2 - Vargem	104.755	116.800	156.220	156.950	174.835	233.965	219.730	244.915	327.405
T3 - Cambuí	65.700	75.190	107.310	98.550	112.785	160.965	137.605	158.045	225.205
T4 - São G. Sapucaí	37.960	44.530	67.160	56.575	66.430	100.740	79.205	93.075	140.890
T5 - Carmo da Cachoeira	41.245	49.275	74.460	61.685	73.365	111.325	86.505	102.930	155.855
T6 - Santo Ant. do Amparo	36.500	42.705	65.335	54.385	64.240	97.820	76.285	89.790	137.240
T7 - Carmópolis de Minas	37.230	43.800	65.700	55.845	65.700	98.550	78.110	91.980	137.605
T8 - Itatiaiuçu	47.085	54.385	76.285	70.445	81.395	113.880	98.550	113.515	159.505

Sentido Sul	Base			Moderado			Acelerado		
	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo
T1 - Mairiporã	277.765	294.555	313.535	415.735	441.285	469.390	582.175	617.580	657.000
T2 - Vargem	105.850	116.435	138.335	158.410	174.470	206.955	221.920	244.185	289.810
T3 - Cambuí	66.430	75.555	100.740	99.645	113.150	151.110	139.430	158.410	211.335
T4 - São G. Sapucaí	55.115	62.415	83.220	82.490	93.440	124.830	115.340	130.670	174.470
T5 - Carmo da Cachoeira	40.515	48.180	70.810	60.955	72.270	106.215	85.045	101.105	148.555
T6 - Santo Ant. do Amparo	35.405	41.975	60.590	53.290	62.780	90.885	74.460	87.965	127.385
T7 - Carmópolis de Minas	36.500	43.070	61.685	54.385	64.240	92.710	76.285	90.155	129.575
T8 - Itatiaiuçu	45.990	53.655	70.810	68.985	79.935	105.850	96.725	112.055	148.190

As áreas de serviço alocadas conforme a metodologia adotada, com suas respectivas ERVEs e UFVs, podem ser identificadas na Figura 4.1. Pode ser facilmente percebido que as maiores áreas de serviço estão localizadas na cidade de São Paulo, onde os fluxos de veículos são maiores. As áreas de serviço localizadas em Três Corações e Belo Horizonte são equivalentes, com menor número de ERVEs. As áreas de serviço SV2 e SV5 estão localizadas praticamente na metade do comprimento da rodovia. De uma maneira geral, as áreas de serviço localizadas no sentido norte da rodovia necessitam de uma quantidade maior de ERVEs do que

as áreas de serviço localizadas no sentido sul, visto que os fluxos máximos projetados de veículos no sentido norte são, em média, 4,6% maiores do que no sentido sul.

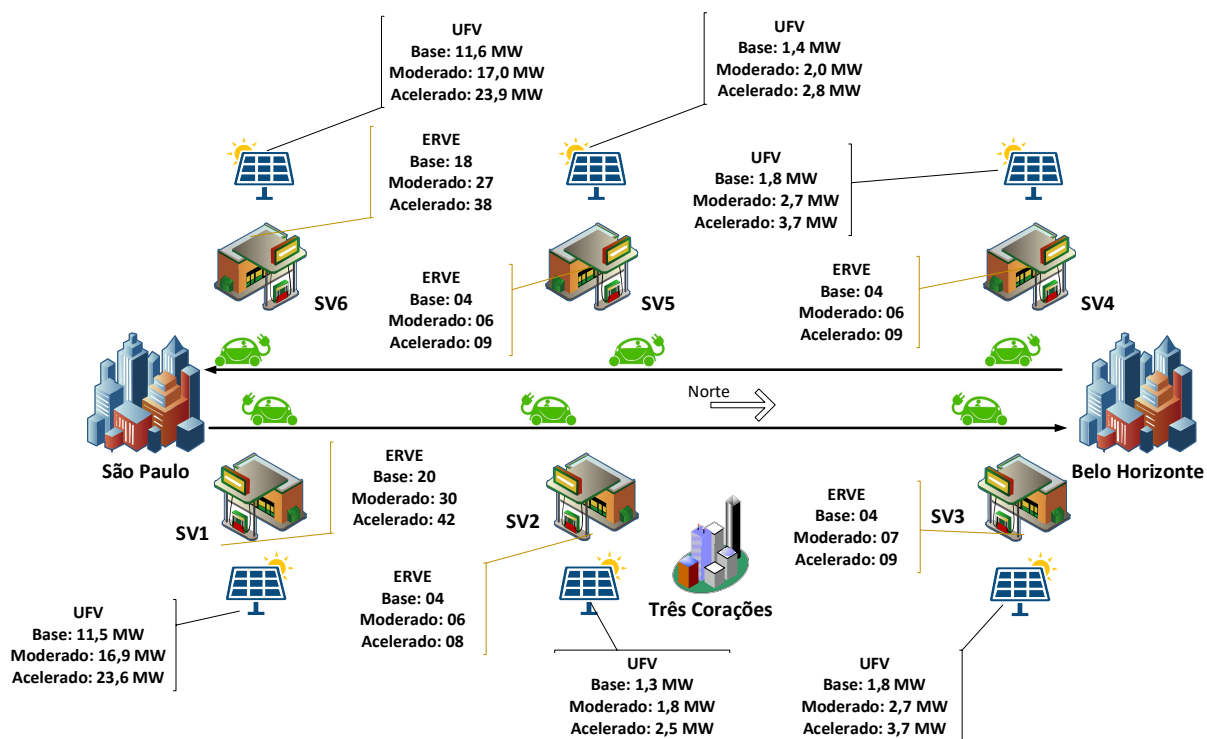


Figura 4.1 – Alocação das áreas de serviço e estações de recarga.

A introdução dos VEs na rodovia Fernão Dias ocasiona um consumo significativo de energia elétrica, conforme mostrado na Figura 4.2. Em todos os cenários, as áreas de serviço SV1 e SV6 são as maiores consumidoras de eletricidade, com consumos variando de aproximadamente 16,5 GWh por ano (cenário Base) até cerca de 34,6 GWh por ano (cenário Acelerado). Tais consumos são comparáveis aos consumos atuais de eletricidade de cidades de pequeno porte do estado de São Paulo, como por exemplo, Águas de Santa Bárbara, com 6075 habitantes, PIB per capita de R\$ 24.673,66 e consumo total de energia elétrica em 2018 de 16,47 GWh (comparável ao cenário Base), ou a cidade de Conchas, com 17896 habitantes, PIB per capita de R\$ 19.518,27 e consumo de eletricidade em 2018 de 35,1 GWh (comparável ao cenário Acelerado) (GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2019; IBGE, 2020). Embora este consumo de eletricidade seja considerável, a recarga dos VEs na rodovia Fernão Dias causaria um impacto muito pequeno no cenário nacional. As estimativas oficiais do governo brasileiro apontam para um consumo final total de eletricidade em 2030 entre 735,8 a 902,5 TWh (EPE, 2018c). Desta forma, para o cenário Base, o consumo total das áreas de serviço representa apenas 0,006% do consumo final total de eletricidade estimado pelo governo (cenário inferior).

Para o cenário Moderado, o valor é de 0,009%. Por fim, para o cenário Acelerado, a relação é de 0,012%.

O aumento no consumo de eletricidade destinada a recarga dos VEs na rodovia Fernão Dias pode ocasionar o aumento das emissões de GEE, se as fontes de energia utilizadas para a geração de eletricidade forem provenientes de combustíveis fósseis. A implementação das UFVs destinadas ao abastecimento dos VEs minimiza este impacto, na medida em que atendem ao consumo das ERVEs. Durante os dias ensolarados, a geração de energia elétrica a partir das UFVs é superior a energia consumida pelas ERVEs, sendo o excedente devolvido para a rede, o que alivia o sistema desde que haja demanda disponível. Esta quantidade de energia injetada na rede contribui para uma menor necessidade do uso de termelétricas para o atendimento ao sistema de distribuição, reduzindo a quantidade de CO₂ emitida na geração, desde que haja flexibilidade do sistema de geração para tal. Durante a noite e nos períodos com baixa irradiação solar, o fornecimento de energia elétrica é provido a partir da rede, podendo esta energia ter sido gerada a partir de fontes renováveis ou não. De fato, toda a energia elétrica gerada pelas UFVs é livre de emissões de CO₂, sendo consumida no abastecimento dos VEs e/ou em outros pontos de consumo conectados à rede de distribuição. A Figura 4.3 demonstra as taxas anuais de emissões de CO₂ que podem ser evitadas pelo uso das UFVs para cada cenário, baseadas no levantamento das emissões de CO₂ da matriz elétrica brasileira, disponível em EPE (2019a). As emissões evitadas pelas UFVs podem ser menores do que os resultados encontrados caso haja redução nos níveis de irradiação solar esperados (e, conseqüentemente, menor geração de energia elétrica nas UFVs) e/ou devido a inflexibilidades do SIN em absorver a energia excedente gerada pelas UFVs, obrigando as mesmas a não injetarem energia na rede para não causar instabilidades.

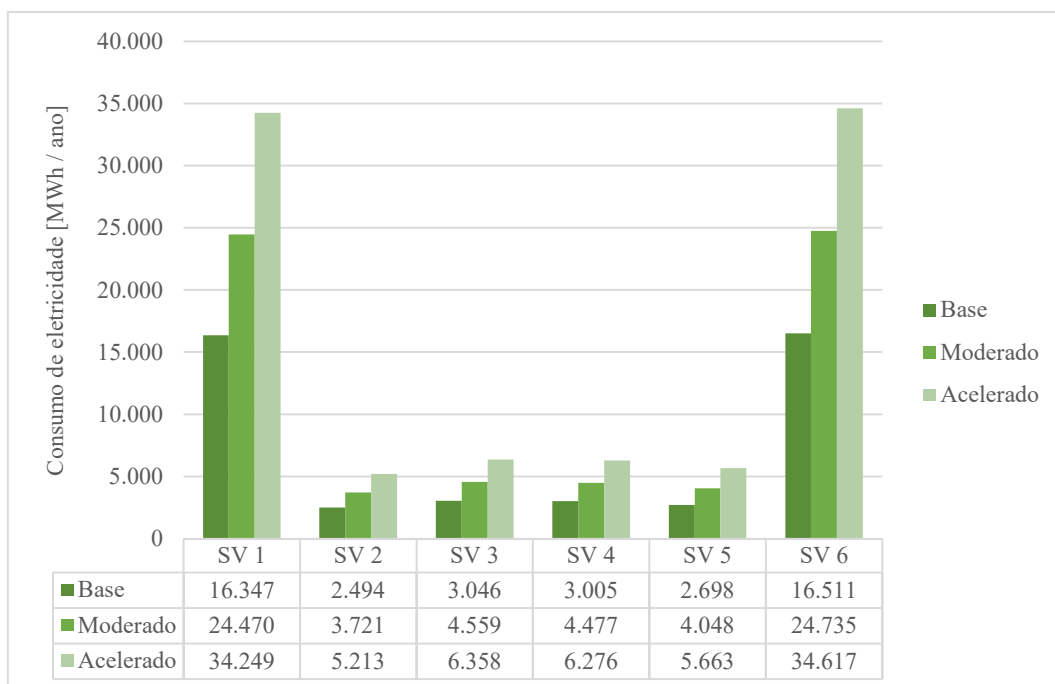


Figura 4.2 – Consumo de eletricidade por área de serviços.

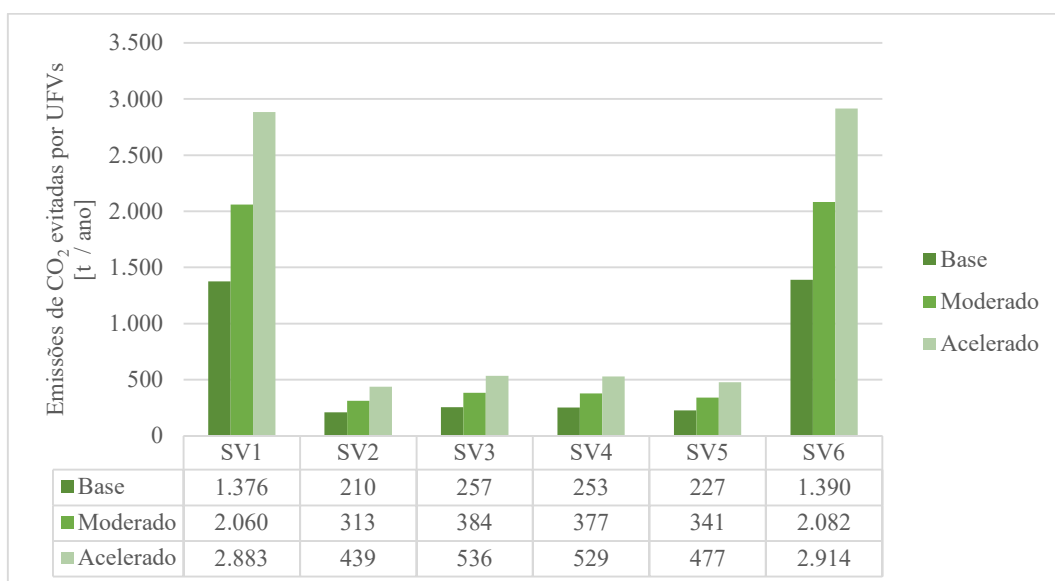


Figura 4.3 – Emissões de CO₂ potencialmente evitadas pelo uso das UFVs por área de serviço.

O uso dos VEs também provoca redução na emissão de CO₂ e outros gases poluentes. A emissão de gases poluentes por veículos automotores geralmente é abordada nos grandes centros urbanos, como em Carvalho (2011) e Filho (2015). Neste sentido, este estudo contribui para a avaliação dos impactos dos VEs nos trajetos interurbanos.

A redução nas emissões de CO₂ ainda conduz a benefícios financeiros, como apontado em *United States Environmental Protection Agency* (2017). O Custo Social do Carbono (SCC)

é uma medida dos danos a longo prazo causados pela emissão de uma tonelada de dióxido de carbono em um determinado ano. Além disto, este valor também representa o valor dos danos evitados pelas reduções nas emissões.

As Figuras 4.4 e 4.5 demonstram a redução nas emissões de NO_x, NMHC, CO e do CO₂. A Figura 4.4 apresenta ainda o SCC para os três cenários elaborados. Para a determinação do SCC foi utilizado o valor previsto para 2030 de \$50,00 por tonelada métrica de carbono. Neste sentido, quanto maior for a penetração dos VEs na frota circulante, maiores serão as reduções na emissão de gases de efeito estufa.

Para efeito comparativo, os automóveis foram responsáveis, em 2018, pela emissão de 74,4 mil toneladas de CO na região metropolitana de São Paulo, além de 8,2 mil toneladas de NO_x e 7,7 mil toneladas de NMHC, segundo Cetesb (2019). O relatório apresenta ainda a estimativa das emissões de CO₂ para a região metropolitana de São Paulo, de cerca de 5,1 milhões de toneladas de CO₂ equivalentes em 2018. As reduções nas emissões encontradas para o cenário Acelerado, quando comparadas às emissões da região metropolitana de São Paulo, correspondem a 0,07% para NO_x, 0,04% para CO, 0,02% para NMHC e 0,29% para CO₂.

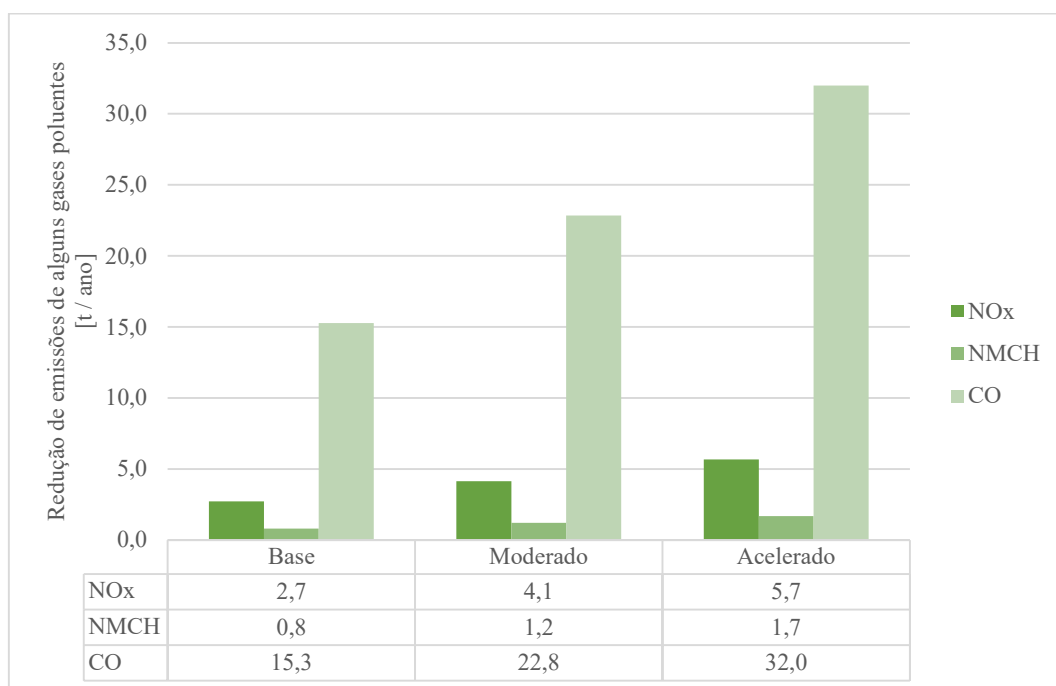


Figura 4.4 – Redução de emissões de NO_x, NMCH e CO pelos veículos elétricos na rodovia Fernão Dias.

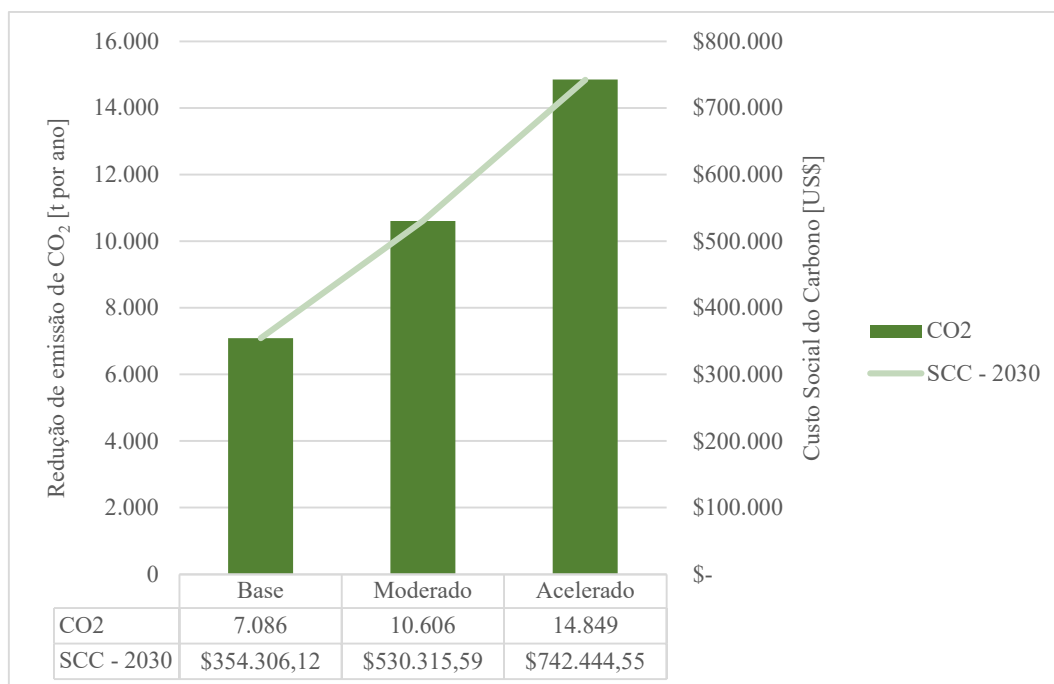


Figura 4.5 – Redução da emissão de CO₂ e Custo Social do Carbono.

O serviço de prestação de recarga para VEs foi autorizado pela ANEEL em 2018, através da Resolução Normativa 819/2018, como divulgado por Reis e Brito (2018) e disponível em ANEEL (2018b). A resolução permite que a prestação de serviço de recarga de VEs seja realizada por concessionárias e permissionárias de serviço público de distribuição de energia elétrica e demais interessados, a preços definidos pelo livre mercado.

A infraestrutura de recargas rápidas é essencial para aumentar o apelo dos VEs, permitindo viagens de longa distância (IEA, 2018). Embora políticas governamentais de incentivo ao desenvolvimento da infraestrutura de recarga sejam necessárias e bem-vindas para a popularização dos VEs, também existem oportunidades a serem exploradas pelo setor privado, como demonstram os resultados financeiros deste estudo.

A Figura 4.6 demonstra o custo da prestação de serviço de recarga por MWh recarregado para as áreas de serviço, ajustados para permitir uma TIR de 10,0%. Para o cenário Base, os custos de recarga variam de R\$ 589,55 / MWh (SV5) até R\$ 697,73 / MWh (SV1). Já para o cenário Moderado, os custos variam de R\$ 582,23 / MWh (SV5) até R\$ 686,50 / MWh (SV1). Por fim, o cenário Acelerado apresentou os custos mais baixos, variando de R\$ 527,31 / MWh (SV2) até R\$ 686,63 / MWh (SV1). A área de serviços SV1 apresentou os maiores custos de recarga em todos os cenários.

A Tabela 4.2 apresenta um resumo das principais informações financeiras referentes a cada área de serviços, incluindo o valor médio da margem EBITDA (*Earnings before Interest,*

Taxes, Depreciation and Amortization), obtida através da divisão entre o valor do EBITDA pela Receita Líquida. A margem EBITDA é um indicador financeiro que permite saber qual o percentual de lucratividade da operação da companhia antes da remuneração do capital de terceiros, dos impostos e da recuperação dos recursos investidos (DICIONÁRIO FINANCEIRO, 2020). Os investimentos necessários vão desde 5,92 milhões de reais (SV2 Base) até 108,7 milhões de reais (SV1 Acelerado). A margem EBITDA variou de 50,3% (SV2 Moderado) até 61,1% (SV6 Base e SV1 Moderado). Sob o aspecto financeiro, o cenário Acelerado apresenta melhores retornos de investimento, com margem EBITDA média de 58,4%, seguido pelo cenário Moderado, com 56,7% e, por fim, pelo cenário Base, com 55,1%.

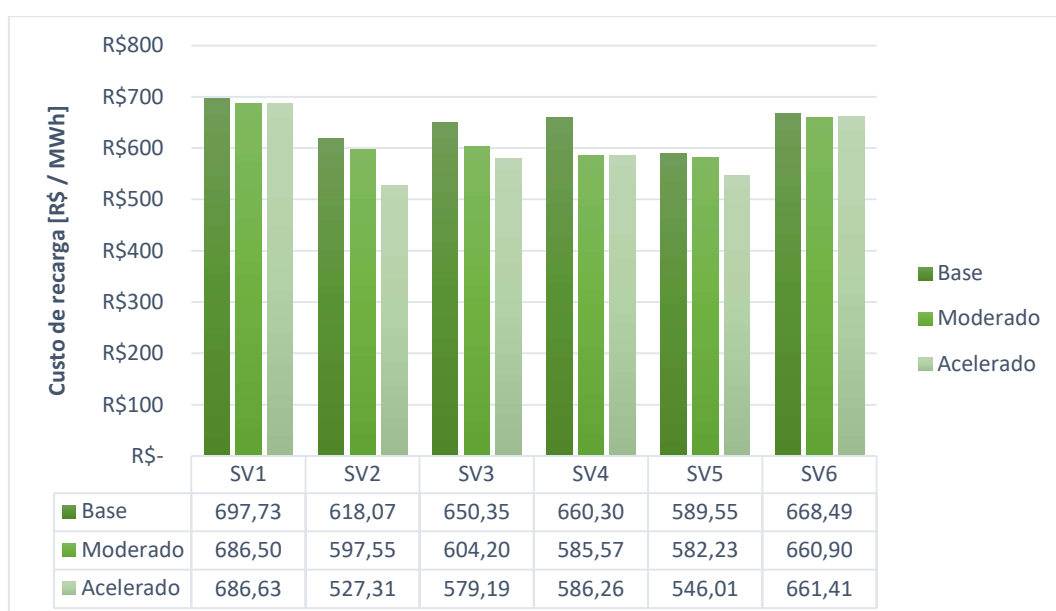


Figura 4.6 – Custo da recarga de veículos elétricos na Fernão Dias.

Tabela 4.2 – Indicadores financeiros referentes a cada área de serviço.

Indicador	Cenário	SV1	SV2	SV3	SV4	SV5	SV6
CAPEX	Base	R\$ 52.841.351,20	R\$ 5.919.768,00	R\$ 8.061.768,00	R\$ 8.098.856,00	R\$ 6.109.856,00	R\$ 51.178.456,00
	Moderado	R\$ 77.902.026,80	R\$ 8.497.152,00	R\$ 12.080.844,00	R\$ 11.863.152,00	R\$ 9.109.152,00	R\$ 75.237.684,00
	Acelerado	R\$ 108.654.837,52	R\$ 11.686.536,00	R\$ 16.341.228,00	R\$ 16.341.228,00	R\$ 13.128.228,00	R\$ 105.512.296,00
OPEX	Base	R\$ 4.246.983,99	R\$ 727.524,00	R\$ 877.848,91	R\$ 876.324,97	R\$ 750.793,86	R\$ 4.104.192,61
	Moderado	R\$ 6.244.921,15	R\$ 1.054.406,86	R\$ 1.111.026,16	R\$ 1.011.593,59	R\$ 1.104.894,16	R\$ 6.149.656,61
	Acelerado	R\$ 8.793.331,81	R\$ 1.155.285,03	R\$ 1.461.406,56	R\$ 1.458.533,96	R\$ 1.301.542,92	R\$ 8.596.147,95
Margem EBITDA	Base	61,0%	50,6%	53,6%	53,7%	50,6%	61,1%
	Moderado	61,1%	50,3%	57,7%	59,6%	50,9%	60,6%
	Acelerado	60,8%	56,0%	58,4%	58,5%	55,9%	60,7%

A Figura 4.7 apresenta um comparativo entre os custos de abastecimento por km rodado na Fernão Dias para diferentes tipos de combustível, onde é possível comparar os custos dos

VEs recarregados nas ERVEs deste estudo com os veículos convencionais que hoje trafegam pela rodovia. Os custos médios dos combustíveis foram retirados do levantamento realizado pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), disponível em ANP (2019), para os estados de São Paulo e Minas Gerais, para o período de 31/05/2020 a 06/06/2020. Os rendimentos em quilômetro por litro utilizados neste comparativo são os mesmos disponíveis em Conpet (2020), utilizados para os cálculos de emissões. Já para o rendimento dos VEs, em quilômetro por quilowatt-hora, foi utilizado o valor médio dos veículos licenciados no Brasil em 2018, de 6,863 km/kWh, conforme valores listados na Tabela 3.5. Os VEs apresentam os menores custos de abastecimento por quilômetro rodado, nos três cenários elaborados. O custo médio do quilômetro rodado dos VEs recarregados na Fernão Dias para os três cenários é 74% menor do que o custo de abastecimento para veículos convencionais movidos somente a gasolina. Quando comparados aos veículos de tecnologia flex fuel, o custo do quilômetro rodado dos VEs é 69% menor do que os veículos movidos a gasolina e 67% menor do que os veículos abastecidos com etanol. Por fim, a diferença é de 66% para os veículos convencionais movidos a diesel.

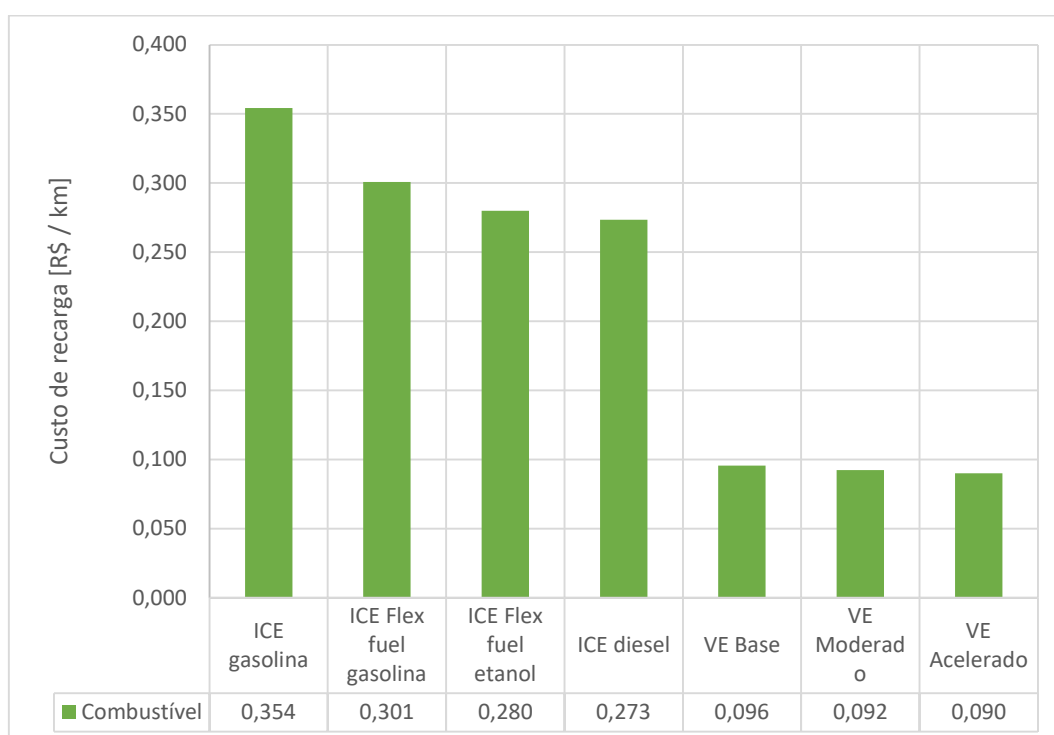


Figura 4.7 – Comparativo entre custos de abastecimento para diferentes combustíveis.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSÃO

A metodologia proposta foi aplicada para projetar o fluxo de VEs circulantes na rodovia Fernão Dias, separados por sentido de circulação, para o ano de 2030. Os modelos de projeção de demanda foram ajustados conforme os dados históricos do mercado brasileiro automobilístico. Foram elaborados três cenários para 2030 (Base, Moderado e Acelerado), diferenciados pelo grau de penetração dos VEs no mercado brasileiro. A metodologia foi aplicada para identificar os locais adequados para a instalação das ERVEs rápidas, assim como sua quantidade necessária, levando em consideração aspectos técnicos relevantes dos VEs e das ERVEs, além do fator psicológico dos motoristas. Com base nas demandas de eletricidade destinadas a recarga dos VEs em cada cenário, foram dimensionadas as UFVs necessárias para atender ao serviço de recarga, obtendo-se menores custos de operação, através da participação no SCEE, além da utilização de energia limpa e renovável para a recarga. Os resultados obtidos mostram uma lista de possíveis localidades na rodovia Fernão Dias para a alocação das ERVEs, suas quantidades necessárias, o consumo de energia elétrica esperado, o tamanho das UFVs projetadas para atender a este consumo e sua área ocupada, além dos impactos desta solução nas emissões de gases de efeito estufa. Além disto, o estudo apresenta os custos relacionados ao serviço de recarga de VEs que poderiam ser praticados na rodovia, além da comparação dos custos por quilômetro rodado entre VEs e automóveis convencionais abastecidos com diferentes tipos de combustíveis.

Este estudo mostrou que a introdução das recargas de VEs na rodovia Fernão Dias a partir de UFVs pode gerar ganhos significativos em termos financeiros e em termos de redução de emissões de GEE, aliados a baixos custos de recarga e com pequenos impactos no consumo de eletricidade no cenário nacional e na área ocupada. Os resultados mostraram um consumo total de eletricidade para todas as áreas de serviço variando entre 44,62 GWh/ano (cenário Base) até 93,47 GWh/ano (cenário Acelerado), o que representa uma parcela pequena do consumo total de eletricidade brasileiro projetado para 2030, ficando entre 0,006% (cenário Base) até 0,012% (cenário Acelerado). É esperada uma redução nas emissões de CO₂ entre 7.086 ton/ano (cenário Base) até 14.849 ton/ano (cenário Acelerado) devido a substituição de uma parcela dos ICEVs por VEs na rodovia Fernão Dias conforme os fluxos projetados para 2030, o que acarretaria um SCC anual variando entre \$ 354.306,12 (cenário Base) a \$ 742.444,55 (cenário

Acelerado). Os custos médios cobrados pela recarga de VEs variam entre R\$ 647,42 / MWh (cenário Base) até R\$ 597,80 / MWh (cenário Acelerado), proporcionando uma TIR de 10,0% e margem EBITDA média entre 55,1% (cenário Base) a 58,4% (cenário Acelerado), o que garante a viabilidade do negócio. Os impactos no uso de área destinada às UFVs também são baixos, já que estas necessitam de uma área total disponível entre 37 ha (cenário Base) até 76 ha (cenário Acelerado), sendo perfeitamente possível de serem alocadas às margens da rodovia. Por fim, os custos encontrados podem ser muito atrativos para o usuário final, com possibilidade de economia de até 74,0% quando comparados aos custos atuais de abastecimento de veículos a combustão interna com combustíveis convencionais.

Embora a frota de VEs no Brasil ainda seja pequena quando comparada a outros países como China, Estados Unidos e União Europeia e os preços dos VEs ainda sejam elevados quando comparados com os ICEVs, o correto planejamento da infraestrutura de recarga será crucial para o seu desenvolvimento e expansão, assim como o uso adequado de fontes de energia limpas para minimizar seus impactos ambientais. Neste sentido, o estudo proposto pode ser utilizado para suportar políticas públicas ou investimentos privados relacionados ao incentivo a eletrificação de rodovias e expansão da frota eletrificada nacional. Avaliações futuras poderão abordar a ampliação do estudo de eletrificação para outras rodovias brasileiras, a estruturação de modelos de negócios relacionados ao serviço de recarga de VEs, os impactos das futuras alterações na legislação que compete ao SCEE e a integração entre as futuras ERVEs e as áreas de serviço já existentes.

REFERÊNCIAS

- ABRAVEI. **AbraVe**. 2020. Disponível em: <http://abravei.org/>. Acesso em: 26 mar. 2020.
- ABVE. **Governo anuncia Rota 2030 e corta IPI para elétricos**. 2018a. Disponível em: <http://www.abve.org.br/governo-anuncia-rota-2030-e-corta-ipi-para-eletricos/>. Acesso em: 3 jun. 2020.
- ABVE. **Electric Mobility Brasil instala eletrovia na Dutra**. 2018b. Disponível em: <http://www.abve.org.br/electric-mobility-instala-eletrovia-na-dutra/>. Acesso em: 28 abr. 2020.
- ALBUQUERQUE, Flavia. **EDP anuncia rede de recarga ultrarrápida de veículos elétricos**. 2019. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2019-10/edp-anuncia-rede-de-recarga-ultrarrapida-de-veiculos-eletricos>. Acesso em: 29 maio. 2020.
- ALHAZMI, Yassir A.; MOSTAFA, Haytham A.; SALAMA, Magdy M. A. Optimal allocation for electric vehicle charging stations using Trip Success Ratio. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, [S. l.], v. 91, p. 101–116, 2017. DOI: 10.1016/j.ijepes.2017.03.009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.03.009>.
- ANEEL. **Resolução Normativa Nº 414, de 09 de Setembro de 2010**. Brasília, p. 205, 2010. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/documents/656877/14486448/bren2010414.pdf/3bd33297-26f9-4ddf-94c3-f01d76d6f14a?version=1.0>.
- ANEEL. **Resolução Normativa Nº 517, de 11 de Dezembro de 2012**. Brasília, 2012a. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012517.pdf>.
- ANEEL. **Resolução Normativa Nº 482, de 17 de Abril de 2012**. Brasília, 2012b. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>.
- ANEEL. **Resolução Normativa Nº 687, de 24 de Novembro de 2015**. Brasília, 2015. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>.
- ANEEL. **Regulamento sobre recarga de veículos elétricos**. 2018a. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/estacoes-de-recarga-de-veiculos-eletricos>. Acesso em: 9 set. 2020.
- ANEEL. **Resolução Normativa Nº 819, de 19 de Junho de 2018**. Brasília, 2018b. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2018819.pdf>.
- ANEEL. **Geração Distribuída**. 2020. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD_Fonte.asp. Acesso em: 16 jul. 2020.
- ANFAVEA. **Anuário da Indústria Automobilística Brasileira 2019**. Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores, São Paulo, p. 1–150, 2019. Disponível em: <http://www.virapagina.com.br/anfavea2019/>.
- ANFAVEA. **Anuário da Indústria Automobilística Brasileira 2020**. Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores, São Paulo, p. 1–143, 2020. Disponível em: <https://anfavea.com.br/anuario2020/anuario.pdf>.

ANGELINE, P. M. Sneha; RAJKUMAR, M. Newlin. Evolution of electric vehicle and its future scope. **Materials Today: Proceedings**, [S. l.], p. 1–7, 2020. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.06.266. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.266>.

ANGELO, Bárbara. **Carros elétricos no Brasil: veja todos os modelos e preços**. 2019. Disponível em: <https://autopapo.uol.com.br/noticia/carros-eletricos-no-brasil-modelos-precos/>. Acesso em: 14 jul. 2020.

ANP. **Sistema de levantamento de preços**. 2019. Disponível em: http://preco.anp.gov.br/include/Resumo_Por_Estado_Index.asp. Acesso em: 19 jun. 2020.

ANTT. **Fluxo Real de Veículos Pagantes Rodovia Fernão Dias**. Agência Nacional de Transportes Terrestres, Brasília, 2020. Disponível em: <https://ouvidoria.antt.gov.br>.

ARROYO, Vicki; HOLSINGER, Heather; WOLOSIN, Michael; LINGUITI, Peter; AHMAD, Sanjana; ADKINS, Liwayway; BUSHINSKY, Josh; CALDWELL, Steve; DIRIGER, Elliot; GREENWALD, Judi; JULIANI, Tim; PEACE, Janet; PENA, Naomi. Policies to Reduce Emissions from the Transportation Sector. **Congressional Policy Briefs Series**, [S. l.], 2008. Disponível em: <http://www.pewclimate.org/DDCF-Briefs/Transportation>.

ARTERIS S/A. **Fernão Dias**. 2020. Disponível em: <https://www.arteris.com.br/rodovias/fernao-dias/>. Acesso em: 10 abr. 2020.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Taxa Selic**. 2020. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/taxaselic>. Acesso em: 22 maio. 2020.

BARAN, Renato; LEGEY, Luiz Fernando Loureiro. The introduction of electric vehicles in Brazil: Impacts on oil and electricity consumption. **Technological Forecasting and Social Change**, [S. l.], v. 80, n. 5, p. 907–917, 2013. DOI: 10.1016/j.techfore.2012.10.024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.techfore.2012.10.024>.

BARBIERI, José Carlos; ÁLVARES, Antonio Carlos Teixeira; MACHLINE, Claude. **Taxa Interna de Retorno: controvérsias e interpretações**. [S. l.], n. 4, p. 131–142, 2007. DOI: 10.15675/gepros.v0i4.184.

BARESCH, Martin; MOSER, Simon. Allocation of e-car charging: Assessing the utilization of charging infrastructures by location. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, [S. l.], v. 124, n. April, p. 388–395, 2019. DOI: 10.1016/j.tra.2019.04.009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.04.009>.

BASS, Frank M. A new product growth for model consumer durables. **Management Science**, [S. l.], v. 15, n. 5, p. 215–227, 1969.

BELLON, Tina. **Tesla becomes most valuable automaker in latest stock rally**. 2020. Disponível em: <https://www.reuters.com/article/us-tesla-shares/tesla-becomes-most-valuable-automaker-in-latest-stock-rally-idUSKBN2426E8>. Acesso em: 21 jul. 2020.

BLAND, Rob; GAO, Wenting; NOFFSINGER, Jesse; SICCARDO, Giulia. **Charging electric-vehicle fleets: How to seize the emerging opportunity**. 2020. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/charging-electric->

vehicle-fleets-how-to-seize-the-emerging-opportunity. Acesso em: 9 set. 2020.

BREWER, Dominic J.; PICUS, Lawrence O. Internal Rate of Return. **Encyclopedia of Education Economics & Finance**, [S. l.], p. 1–18, 2016. DOI: 10.4135/9781483346595.n152.

ÇAĞATAY BAYINDIR, Kamil; GÖZÜKÜÇÜK, Mehmet Ali; TEKE, Ahmet. A comprehensive overview of hybrid electric vehicle: Powertrain configurations, powertrain control techniques and electronic control units. **Energy Conversion and Management**, [S. l.], v. 52, n. 2, p. 1305–1313, 2011. DOI: 10.1016/j.enconman.2010.09.028.

CANNON, Pam. **How a lack of public EV charging stations is creating big business opportunities**. 2020. Disponível em: <https://www.abb-conversations.com/2020/06/how-a-lack-of-public-ev-charging-stations-is-creating-big-business-opportunities/>. Acesso em: 4 set. 2020.

CARVALHO, Carlos Henrique Ribeiro De. **Emissões Relativas De Poluentes Do Transporte Motorizado De Passageiros Nos Grandes Centros Urbanos Brasileiros**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, Brasília, p. 1–42, 2011. Disponível em: http://www.en.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/TDs/td_1606.pdf.

CASTRO, Gabriel; MORAIS, Rafael; FERREIRA, Daniel Viana; TOMMASSO, Francesco; MORAIS, Rafael. **TDSE 79: Impactos Sistêmicos da Micro e Minigeração Distribuída**. GESEL- Grupo de Estudos do Setor Elétrico, Rio de Janeiro, v. 79, p. 1–62, 2018.

CEMIG. **Fale conosco**. 2020a. Disponível em: http://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/Paginas/fale_conosco.aspx. Acesso em: 15 maio. 2020.

CEMIG. **Tarifa de energia CEMIG**. 2020b. Disponível em: <https://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/corporativo/Paginas/tarifas.aspx>. Acesso em: 21 abr. 2020.

CEMIG. **Cemig cria ferramenta para indicar disponibilidade de novas conexões fotovoltaicas de GD**. 2020c. Disponível em: <http://www.cemig.com.br/sites/Imprensa/pt-br/Paginas/29.06.20-cemig-cria-ferramenta-para-indicar-novas-conexoes-fotovoltaicas-de-gd.aspx>. Acesso em: 9 jul. 2020.

CEMIG. **Mapa de Disponibilidade**. 2020d. Disponível em: <https://geo.cemig.com.br/mca/Home/IndexData>. Acesso em: 9 jul. 2020.

CETESB. Emissões Veiculares no Estado de São Paulo 2018. **Governo do Estado de São Paulo**, São Paulo, 2019.

CHAN, C. C.; WONG, Y. S. The state of the art of electric vehicles technology. **Conference Proceedings - IPEMC 2004: 4th International Power Electronics and Motion Control Conference**, [S. l.], v. 1, p. 46–57, 2004.

CHANDRA MOULI, Gautham Ram. **Charging electric vehicles from solar energy: Power converter, charging algorithm and system design**. 2018. Delft University of Technology, Delft, 2018. DOI: 0.4233/uuid:dec62be4-d7cb-4345-a8ae-65152c78b80f.

CHARGEMAP. **Chargemap**. 2020. Disponível em: <https://chargemap.com/map>. Acesso em:

29 maio. 2020.

CHARGEPOINT. **Chargepoint**. 2020. Disponível em: <https://www.chargepoint.com/>. Acesso em: 9 set. 2020.

CLEMENT, Kristien; HAESSEN, Edwin; DRIESEN, Johan. Coordinated charging of multiple plug-in hybrid electric vehicles in residential distribution grids. **2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, PSCE 2009**, [S. l.], p. 1–7, 2009. DOI: 10.1109/PSCE.2009.4839973.

CONPET. **Programa Brasileiro de Etiquetagem**. 2020. Disponível em: <http://pbeveicular.petrobras.com.br/TabelaConsumo.aspx>. Acesso em: 20 maio. 2020.

CONSTANTINO, Gabriel; FREITAS, Marcos; FIDELIS, Neilton; PEREIRA, Marcio Giannini. Adoption of photovoltaic systems along a sure path: A life-cycle assessment (LCA) study applied to the analysis of GHG emission impacts. **Energies**, [S. l.], v. 11, n. 10, 2018. DOI: 10.3390/en11102806.

COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. **Cutting emissions: Council adopts CO2 standards for trucks**. 2020. Disponível em: <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2019/06/13/cutting-emissions-council-adopts-co2-standards-for-trucks/>. Acesso em: 20 maio. 2020.

CPFL ENERGIA. **Tipo 1 SAE J1772**. 2017a. Disponível em: https://www.cpfl.com.br/sites/mobilidade-eletrica/mobilidade-e/tipos-de-plug/Paginas/Tipo_1_-_SAE-J1772.aspx. Acesso em: 28 ago. 2020.

CPFL ENERGIA. **Tipo 2 Mennekes**. 2017b. Disponível em: https://www.cpfl.com.br/sites/mobilidade-eletrica/mobilidade-e/tipos-de-plug/Paginas/Tipo_2_-_Mennekes.aspx. Acesso em: 28 ago. 2020.

CPFL ENERGIA. **CHAdEMO recarga rápida CC**. 2017c. Disponível em: <https://www.cpfl.com.br/sites/mobilidade-eletrica/mobilidade-e/tipos-de-plug/Paginas/Chademo-yazaki.aspx>. Acesso em: 28 ago. 2020.

CPFL ENERGIA. **Combo CCS - Tipo 1 e Tipo 2**. 2017d. Disponível em: <https://www.cpfl.com.br/sites/mobilidade-eletrica/mobilidade-e/tipos-de-plug/Paginas/Combo-CCS.aspx>. Acesso em: 28 ago. 2020.

DARGAY, Joyce; GATELY, Dermot; SOMMER, Martin. Vehicle ownership and income growth, worldwide: 1960-2030. **Energy Journal**, [S. l.], v. 28, n. 4, p. 143–170, 2007. DOI: 10.5547/ISSN0195-6574-EJ-Vol28-No4-7.

DAS, Himadry Shekhar; TAN, Chee Wei; YATIM, A. H. M. Fuel cell hybrid electric vehicles: A review on power conditioning units and topologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 76, n. March, p. 268–291, 2017. DOI: 10.1016/j.rser.2017.03.056. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.056>.

DICIONÁRIO FINANCEIRO. **O que é EBITDA?** 2020. Disponível em: <https://www.dicionariofinanceiro.com/ebitda/>. Acesso em: 27 maio. 2020.

DUCHARME, Pierre; KARGAS, Catherine. Feasibility of a Pan-Canadian network of DC fast charging stations for EVs. **EVS 2016 - 29th International Electric Vehicle Symposium**, [S. l.], v. 8, p. 1–13, 2016.

EHSANI, Mehrdad; GAO, Yimin; MILLER, John M. Hybrid electric vehicles: Architecture and motor drives. **Proceedings of the IEEE**, [S. l.], v. 95, n. 4, p. 719–728, 2007. DOI: 10.1109/JPROC.2007.892492.

ELECTRICMOBILITY. **EFACEC QC45**. 2020. Disponível em: <http://electricmobilitybrasil.com/qc45/>. Acesso em: 28 abr. 2020.

ELECTRICUS. **Electricus**. 2020. Disponível em: <https://www.electricus.com.br/>. Acesso em: 28 abr. 2020.

ENEL. **Canais de comunicação**. 2020a. Disponível em: <https://www.eneldistribuicao.com.br/atendimento/atendimento-para-seu-negocio>. Acesso em: 15 maio. 2020.

ENEL. **Tarifa de energia ENEL**. 2020b. Disponível em: <https://www.eneldistribuicao.com.br/corporativo-poder-publico/tarifa-de-energia-eletrica>. Acesso em: 21 abr. 2020.

EPA. **Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks - 1990 - 2018**. Washington, p. 733, 2020a. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2020-04/documents/us-ghg-inventory-2020-main-text.pdf>.

EPA. **The Safer Affordable Fuel-Efficient (SAFE) Vehicles Rule for Model Years 2021–2026 Passenger Cars and Light Trucks**. 2020b. Disponível em: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2020-04-30/pdf/2020-06967.pdf>. Acesso em: 3 jun. 2020.

EPE. **Eletromobilidade e Biocombustíveis: Documento de Apoio ao PNE 2050**. Ministério de Minas e Energia, Rio de Janeiro, p. 1–39, 2018a. Disponível em: [http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-457/Eletromobilidade e Biocombustiveis.pdf](http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-457/Eletromobilidade_e_Biocombustiveis.pdf).

EPE. **Demanda De Energia Dos Veículos Leves : 2018-2030**. Ministério de Minas e Energia, Rio de Janeiro, p. 1–5, 2018b.

EPE. **Cenários de Demanda para o PNE 2050**. Ministério de Minas e Energia, Rio de Janeiro, p. 1–34, 2018c.

EPE. **Balço Energético Nacional 2019. Relatório síntese ano base 2018**. Ministério de Minas e Energia, Rio de Janeiro, p. 1–67, 2019a. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-470/Relatório Síntese BEN 2019 Ano Base 2018.pdf>.

EPE. **Cenário econômico para os próximos dez anos (2020-2029)**. Ministério de Minas e

Energia, Rio de Janeiro, p. 1–17, 2019b.

EPE. **Balço Energético Nacional: ano base 2018**. Ministério de Minas e Energia, Rio de Janeiro, p. 1–303, 2019c.

EUROPEAN COMMISSION. **Transport emissions**. 2016a. Disponível em: https://ec.europa.eu/clima/policies/transport_en#tab-0-0. Acesso em: 3 jun. 2020.

EUROPEAN COMMISSION. **A European Strategy for Low-Emission Mobility**. 2016b. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX:52016DC0501>. Acesso em: 3 jun. 2020.

EUROPEAN COMMISSION. **Our Vision for A Clean Planet for All**. Bruxelas, n. November, 2018. Disponível em: https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/docs/pages/vision_1_emissions_en.pdf.

EUROPEAN COMMISSION. **2050 long-term strategy**. 2020. Disponível em: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_en. Acesso em: 20 maio. 2020.

EV COMPARE. **EV compare**. 2020. Disponível em: <https://evcompare.io>. Acesso em: 5 jun. 2020.

FACHRIZAL, Reza; SHEPERO, Mahmoud; VAN DER MEER, Dennis; MUNKHAMMAR, Joakim; WIDÉN, Joakim. Smart charging of electric vehicles considering photovoltaic power production and electricity consumption: A review. **eTransportation**, [S. l.], v. 4, p. 100056, 2020. DOI: 10.1016/j.etrans.2020.100056. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2020.100056>.

FILHO, Rodrigues P. M. S. .. P. A. Silva. Quantificação das emissões de dióxido de carbono (CO₂) por veículos automotores na cidade de Boa Vista/RR - 2005 a 2015. **7º Congresso Luso Brasileiro para o Planejamento Urbano, Regional, Integrado e Sustentável**, [S. l.], v. 3, n. 2, p. 54–67, 2015. Disponível em: <http://repositorio.unan.edu.ni/2986/1/5624.pdf>.

FORBES. **Crescimento do mercado de veículos elétricos abre espaço para novas empresas**. 2018. Disponível em: <https://forbes.com.br/negocios/2018/07/crescimento-do-mercado-de-veiculos-eletricos-abre-espaco-para-novas-empresas/>. Acesso em: 9 set. 2020.

FÓRUM VEÍCULOS ELÉTRICOS E MOBILIDADE ELÉTRICA. **Dados Denatran**. 2020. Disponível em: https://www.forumve.com/dados/2019_12/estat-denatran.html#sel_Sobre. Acesso em: 10 abr. 2020.

FRANKE, Thomas; KREMS, Josef F. Interacting with limited mobility resources: Psychological range levels in electric vehicle use. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, [S. l.], v. 48, p. 109–122, 2013. DOI: 10.1016/j.tra.2012.10.010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2012.10.010>.

FREITAS, Joaquim Carlos Novais De. **Projeto e análise de carros elétricos**. 2012. Universidade do Minho, Braga, 2012.

GAURAV, Dwaramakki; MANIMARAN, Harinarayanan. **Impact of EV Charging Station**

on the Electric Distribution Grid. 2015. Politecnico di Milano, [S. l.], 2015. Disponível em: https://www.politesi.polimi.it/bitstream/10589/120624/1/Thesis_LM.pdf.

GOOGLE MAPS. **Mapa de São Paulo - SP (2020).** 2020. Disponível em: <https://www.google.com.br/maps/place/São+Paulo,+SP/@-23.4058838,-46.5803267,2737m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x94ce448183a461d1:0x9ba94b08ff335bae!8m2!3d-23.5505199!4d-46.6333094>. Acesso em: 5 jan. 2021.

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Anuário de Energéticos do Estado de São Paulo ano base 2018.** São Paulo, v. 53, n. 9, p. 1689–1699, 2019.

GREENER ESTRATÉGIA E PESQUISA. **Estudo Estratégico: Mercado Fotovoltaico GD - 4º Trimestre de 2019.** São Paulo, p. 1–78, 2019. Disponível em: <http://greener.greener.com.br/estudo-gd-1sem2019>.

GREENER ESTRATÉGIA E PESQUISA. **Grandes Usinas Solares 2020: Mercado Livre e Leilões.** São Paulo, p. 1–44, 2020. Disponível em: <https://www.greener.com.br/pesquisas-de-mercado/estudo-grandes-usinas-solares/>.

HARADA, Hirohisa Uchida; MAKOTO, R. Utilization of hydrogen energy. *In*: MIRANDA, Paulo E. V. De (org.). **Science and Engineering of Hydrogen-Based Energy Technologies: Hydrogen Production and Practical Applications in Energy Generation.** Rio de Janeiro: Academic Press, 2018. p. 237–258. DOI: 10.1016/B978-0-12-814251-6.00012-5.

HODGSON, M. John. A Flow-Capturing Location-Allocation Model. **Geographical Analysis, [S. l.]**, v. 22, n. 3, p. 270–279, 1990. DOI: 10.1111/j.1538-4632.1990.tb00210.x.

IBGE. **Cidades@.** 2020. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/>. Acesso em: 14 abr. 2020.

IEA. **Global EV Outlook 2018.** Paris, 2018. DOI: 10.1787/9789264302365-en.

IEA. **Key World Energy Statistics - 2019.** Paris, p. 50–63, 2019a. DOI: 10.1016/B978-0-12-409548-9.00927-1.

IEA. **Global EV Outlook 2019.** Paris, p. 232, 2019b. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2019>.

INCHARGE APP. **Incharge.** 2020. Disponível em: <https://www.incharge.app/>. Acesso em: 5 jun. 2020.

JAC MOTORS. **Ficha Técnica IEV 40.** 2020. Disponível em: http://iev40.com.br/fichaTec_iev40.pdf. Acesso em: 14 abr. 2020.

JP MORGAN. Eye on the market - Energy Outlook 2018: Pascal's Wager. **Annual Energy Paper, [S. l.]**, n. iii, p. 1–12, 2018.

KUMAR, M. Satyendra; REVANKAR, Shripad T. Development scheme and key technology of an electric vehicle: An overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews, [S. l.]**, v. 70, n. December, p. 1266–1285, 2017. DOI: 10.1016/j.rser.2016.12.027. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.027>.

LAFRANQUE, Alexandre. **A emergência de modelos de negócios inovadores para apoiar o desenvolvimento da eletrificação veicular**. 2015. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2538.html>.

LEE, Henry; CLARK, Alex. Charging the future: challenges and opportunities for Electric Vehicle Adoption. **Environment and natural resources - Harvard Kennedy School**, Cambridge, p. 1–77, 2018.

LI, Zhenhe; KHAJEPOUR, Amir; SONG, Jinchun. A comprehensive review of the key technologies for pure electric vehicles. **Energy**, [S. l.], v. 182, p. 824–839, 2019. DOI: 10.1016/j.energy.2019.06.077. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.077>.

LIU, Jin peng; ZHANG, Teng xi; ZHU, Jiang; MA, Tian nan. Allocation optimization of electric vehicle charging station (EVCS) considering with charging satisfaction and distributed renewables integration. **Energy**, [S. l.], v. 164, p. 560–574, 2018. DOI: 10.1016/j.energy.2018.09.028.

MAHMOUDZADEH ANDWARI, Amin; PESIRIDIS, Apostolos; RAJOO, Srithar; MARTINEZ-BOTAS, Ricardo; ESFAHANIAN, Vahid. A review of Battery Electric Vehicle technology and readiness levels. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 78, n. March, p. 414–430, 2017. DOI: 10.1016/j.rser.2017.03.138. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.138>.

MARTINS, J.; BRITO, F. P.; PEDROSA, D.; MONTEIRO, V.; JOÃO, L. Real-Life Comparison Between Diesel and Electric Car Energy Consumption. **Grid Electrified Vehicles: Performance, Design and Environmental Impacts**, [S. l.], n. December 2015, p. 209–232, 2013.

MATULKA, Rebecca. **The History of the Electric Car**. 2014. Disponível em: <https://www.energy.gov/articles/history-electric-car>. Acesso em: 21 jul. 2020.

MAXTON. **Principais rodovias do Brasil**. 2018. Disponível em: <https://maxtonlogistica.com.br/as-principais-rodovias-do-brasil/>. Acesso em: 10 abr. 2020.

MCLAREN, Joyce. Distributed solar photovoltaics for electric vehicle charging: Regulatory and policy considerations. **43rd ASES National Solar Conference 2014, SOLAR 2014, Including the 39th National Passive Solar Conference and the 2nd Meeting of Young and Emerging Professionals in Renewable Energy**, [S. l.], v. 2, p. 1364–1367, 2014.

MELAINA, Marc; BREMSON, Joel. Refueling availability for alternative fuel vehicle markets: Sufficient urban station coverage. **Energy Policy**, [S. l.], v. 36, n. 8, p. 3233–3241, 2008. DOI: 10.1016/j.enpol.2008.04.025.

MINISTÉRIO DA ECONOMIA. **Rota 2030 - Mobilidade e Logística**. 2019. Disponível em: <http://www.mdic.gov.br/index.php/competitividade-industrial/setor-automotivo/rota2030#:~:text=O Programa Rota 2030 - Mobilidade,um regime tributário especial para. Acesso em: 3 jun. 2020>.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários - ano-base 2013**. Brasília, p. 1–115, 2014.

MORNINGSTAR. **Morningstar**. 2020. Disponível em: <https://www.morningstar.com/>. Acesso em: 29 maio. 2020.

MOULI, Gautham Ram Chandra; VENUGOPAL, Prasanth; BAUER, Pavol. Future of electric vehicle charging. **19th International Symposium on Power Electronics, Ee 2017, [S. l.]**, v. 2017- Decem, p. 1–7, 2017. DOI: 10.1109/PEE.2017.8171657.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **A ONU e a Mudança Climática**. 2020. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/acao/mudanca-climatica/>. Acesso em: 14 jul. 2020.

NAPOLI, Giuseppe; POLIMENI, Antonio; MICARI, Salvatore; ANDALORO, Laura; ANTONUCCI, Vincenzo. Optimal allocation of electric vehicle charging stations in a highway network: Part 1. Methodology and test application. **Journal of Energy Storage, [S. l.]**, v. 27, p. 101102, 2020. DOI: 10.1016/j.est.2019.101102. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101102>.

NAPOLI, Giuseppe; POLIMENI, Antonio; MICARI, Salvatore; DISPENZA, Giorgio; ANTONUCCI, Vincenzo. Optimal allocation of electric vehicle charging stations in a highway network: Part 2. The Italian case study. **Journal of Energy Storage, [S. l.]**, v. 26, n. April, p. 101015, 2019. DOI: 10.1016/j.est.2019.101015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101015>.

NEUBAUER, Jeremy; WOOD, Eric; BURTON, Evan; SMITH, Kandler; PESARAN, Ahmad A. Impact of fast charging on life of EV ws. **28th International Electric Vehicle Symposium and Exhibition 2015, EVS 2015, [S. l.]**, v. 1, p. 1–22, 2015.

NICHOLAS, Michael. Estimating electric vehicle charging infrastructure costs across major U.S. metropolitan areas. **International Council on Clean Transportation**, Washington, n. 14, p. 1–11, 2019. Disponível em: https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_EV_Charging_Cost_20190813.pdf.

NOVAIS, Celso Ribeiro Barbosa. Modalidade Elétrica: Desafios e Oportunidades. **FGV Energia**, Rio de Janeiro, p. 10, 2016. Disponível em: [http://www.fgv.br/fgvenergia/celso_novais_mobilidade_eletrica/files/assets/common/downloads/Celso Novais_Mobilidade Eletrica.pdf](http://www.fgv.br/fgvenergia/celso_novais_mobilidade_eletrica/files/assets/common/downloads/Celso%20Novais_Mobilidade%20Eletrica.pdf).

NUNES, Pedro; FARIAS, Tiago; BRITO, Miguel C. Day charging electric vehicles with excess solar electricity for a sustainable energy system. **Energy, [S. l.]**, v. 80, p. 263–274, 2015. DOI: 10.1016/j.energy.2014.11.069. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2014.11.069>.

O’KANE, Sean. **Tesla launches faster third generation Supercharger**. 2019. Disponível em: <https://www.theverge.com/2019/3/6/18253618/tesla-supercharger-250kw-v3-specs-location>. Acesso em: 26 ago. 2020.

OPEN CHARGE MAP. **Open Charge Map**. 2020. Disponível em: <https://openchargemap.org/site>. Acesso em: 29 maio. 2020.

PABLO, Jesús Montoya Sánchez De; LÓPEZ, María Miravalles; BRET, Antoine. **How Green are Electric or Hydrogen-Powered Cars? Assessing GHG Emissions of Traffic in Spain.** Ciudad Real: Springer International Publishing, 2016.

PAN, Long; YAO, Enjian; YANG, Yang; ZHANG, Rui. A location model for electric vehicle (EV) public charging stations based on drivers' existing activities. **Sustainable Cities and Society**, [S. l.], v. 59, p. 102192, 2020. DOI: 10.1016/j.scs.2020.102192. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102192>.

PEREIRA, Enio Bueno et al. Atlas Brasileiro de Energia Solar. **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**, [S. l.], p. 1–88, 2017. Disponível em: <http://urlib.net/rep/8JMKD3MGP3W34P/3PERDJE>.

PLUGSHARE. **Plugshare**. 2020. Disponível em: <https://www.plugshare.com/>. Acesso em: 29 maio. 2020.

QIU, Chengqun; WANG, Guolin; MENG, Mingyu; SHEN, Yujie. A novel control strategy of regenerative braking system for electric vehicles under safety critical driving situations. **Energy**, [S. l.], v. 149, p. 329–340, 2018. DOI: 10.1016/j.energy.2018.02.046. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.046>.

REDAÇÃO CICLO VIVO. **Audi vai instalar 200 pontos de recarga de elétricos no Brasil**. 2020. Disponível em: <https://ciclovivo.com.br/arq-urb/mobilidade/audi-infraestrutura-de-recarga-eletricos/>. Acesso em: 11 set. 2020.

REIS, Alessandro; BRITO, Eugênio Augusto. **Brasil enfim aprova serviço de recarga de carros elétricos**. 2018. Disponível em: <https://www.uol.com.br/carros/noticias/redacao/2018/06/20/brasil-enfim-aprova-recarga-publica-de-carros-eletricos-mas-como-fica.htm>. Acesso em: 27 maio. 2020.

REIS, Sueli. **São Paulo terá rede de recarga ultrarrápida para carros elétricos**. 2019. Disponível em: <https://www.automotivebusiness.com.br/inovacao/519/sao-paulo-tera-rede-de-recarga-ultrarrapida-para-carros-eletricos->. Acesso em: 9 set. 2020.

REZVANI, Zeinab; JANSSON, Johan; BODIN, Jan. Advances in consumer electric vehicle adoption research: A review and research agenda. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, [S. l.], v. 34, p. 122–136, 2015. DOI: 10.1016/j.trd.2014.10.010.

RIBAU, João; SILVA, Carla; BRITO, Francisco P.; MARTINS, Jorge. Analysis of four-stroke, Wankel, and microturbine based range extenders for electric vehicles. **Energy Conversion and Management**, [S. l.], v. 58, p. 120–133, 2012. DOI: 10.1016/j.enconman.2012.01.011.

SALVO, Francesca; CIUNA, Marina; DE RUGGIERO, Manuela; MARCHIANÒ, Samuele. Economic valuation of ground mounted photovoltaic systems. **Buildings**, [S. l.], v. 7, n. 2, p. 1–14, 2017. DOI: 10.3390/buildings7020054.

SAN ROMÁN, Tomás Gómez; MOMBER, Ilan; ABBAD, Michel Rivier; SÁNCHEZ MIRALLES, Álvaro. Regulatory framework and business models for charging plug-in electric

vehicles: Infrastructure, agents, and commercial relationships. **Energy Policy**, [S. l.], v. 39, n. 10, p. 6360–6375, 2011. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.07.037.

SCHROEDER, Andreas; TRABER, Thure. The economics of fast charging infrastructure for electric vehicles. **Energy Policy**, [S. l.], v. 43, p. 136–144, 2012. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.12.041. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2011.12.041>. SHIRK, Matthew; WISHART, Jeffrey. Effects of Electric Vehicle Fast Charging on Battery Life and Vehicle Performance. **SAE Technical Papers**, [S. l.], v. 2015-April, n. April, 2015. DOI: 10.4271/2015-01-1190.

SILVA, Tatiane C.; PINTO, Gabriel M.; DE SOUZA, Túlio A. Z.; VALERIO, Victor; SILVÉRIO, Naidion M.; CORONADO, Christian J. R.; GUARDIA, Eduardo Crestana. Technical and economical evaluation of the photovoltaic system in Brazilian public buildings: A case study for peak and off-peak hours. **Energy**, [S. l.], v. 190, p. 116282, 2020. DOI: 10.1016/j.energy.2019.116282. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116282>.

SINDIPEÇAS. **Relatório da Frota Circulante - Edição 2019**. São Paulo, p. 1–13, 2019. Disponível em: https://www.sindipeças.org.br/sindinews/Economia/2019/RelatorioFrotaCirculante_Maio_2019.pdf.

SOARES, Lucas; RODRIGUES, Fernanda; MELO, Régis. **Bandeirantes, JK e a duplicação que demorou mais de uma década: conheça a história da Fernão Dias**. 2018. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/sul-de-minas/noticia/bandeirantes-jk-e-a-duplicacao-que-demorou-mais-de-uma-decada-conheca-a-historia-da-fernao-dias.ghtml>. Acesso em: 12 jun. 2020.

STOCKER, T.F.; QIN, D.; PLATTNER, G.K.; TIGNOR, M.; ALLEN, S.K.; BOSCHUNG, J.; NAUELS, A.; XIA, Y.; BEX, V.; MIDGLEY, P.M.. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. **Intergovernmental Panel on Climate Change**, New York, p. 1585, 2013. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>.

TAVARES, Nicolas. **Conectores de recarga: quais são os tipos que existem**. 2019. Disponível em: <https://insideevs.uol.com.br/features/379522/conector-tomada-recarga-tipos/>. Acesso em: 28 ago. 2020.

TAWALBEH, Muhammad; AL-OTHMAN, Amani; KAFIAH, Feras; ABDELSALAM, Emad; ALMOMANI, Fares; ALKASRAWI, Malek. Environmental impacts of solar photovoltaic systems: A critical review of recent progress and future outlook. **Science of the Total Environment**, [S. l.], v. 759, p. 143528, 2021. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143528. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143528>.

THE WORLD BANK. **GDP per capita (constant 2010 US\$) - Brazil**. 2019. Disponível em: <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.KD?end=2018&locations=BR&start=1990&view=chart>. Acesso em: 28 fev. 2020.

TN SUL. **Sul poderá contar com duas estações rápidas para recarga de veículos elétrico**. 2020. Disponível em: <https://tnsul.com/2020/destaque/sul-podera-contar-com-duas-estacoes-rapidas-para-recarga-de-veiculos-eletrico/>. Acesso em: 11 set. 2020.

TOMASZEWSKA, Anna et al. Lithium-ion battery fast charging: A review. **eTransportation**, [S. l.], v. 1, p. 100011, 2019. DOI: 10.1016/j.etrans.2019.100011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2019.100011>.

TORABI, Farschad; AHMADI, Pouria. Battery technologies. *In: Simulation of Battery Systems*. Tehran: Academic Press, 2019. p. 1–54. DOI: 10.1016/b978-0-12-816212-5.00005-2.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **The Social Cost of Carbon**. 2017. Disponível em: https://19january2017snapshot.epa.gov/climatechange/social-cost-carbon_.html. Acesso em: 13 maio. 2020.

VAN DEN BOSSCHE, Peter. Electric Vehicle Charging Infrastructure. *In: Electric and Hybrid Vehicles*. Bruxelas: Elsevier B.V, 2010. p. 517–543. DOI: 10.1016/B978-0-444-53565-8.00020-8. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-53565-8.00020-8>.

VELA, Germán Andrés Lozano. **Dimensionamento e seleção do sistema de armazenamento para sistemas híbridos de geração de eletricidade biomassa/fotovoltaica**. 2018. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2018.

VEZIROGLU, A.; MACÁRIO, R. Fuel cell vehicles (FCVs): State-of-the-art with economic and environmental concerns. *In: BASILE, Angelo (org.). Handbook of Membrane Reactors*. Lisboa: Woodhead Publishing Limited, 2013. v. 2p. 633–680. DOI: 10.1533/9780857097347.3.633. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1533/9780857097347.3.633>.

VONBUN, Christian. **Impactos ambientais e econômicos dos veículos elétricos e híbridos**. Ipea, Brasília, p. 48, 2015.

WEISS, Martin; PATEL, Martin K.; JUNGINGER, Martin; PERUJO, Adolfo; BONNEL, Pierre; VAN GROOTVELD, Geert. On the electrification of road transport - Learning rates and price forecasts for hybrid-electric and battery-electric vehicles. **Energy Policy**, [S. l.], v. 48, p. 374–393, 2012. DOI: 10.1016/j.enpol.2012.05.038. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.05.038>.

WEN, Jianwu; YU, Yan; CHEN, Chunhua. A review on lithium-ion batteries safety issues: Existing problems and possible solutions. **Materials Express**, [S. l.], v. 2, n. 3, p. 197–212, 2012. DOI: 10.1166/mex.2012.1075.

YE, Bin; JIANG, Jingjing; MIAO, Lixin; YANG, Peng; LI, Ji; SHEN, Bo. Feasibility study of a solar-powered electric vehicle charging station model. **Energies**, [S. l.], v. 8, n. 11, p. 13265–13283, 2015. DOI: 10.3390/en8112368.

YUAN, Quan; HAO, Wei; SU, Haotian; BING, Guanwen; GUI, Xinyuan; SAFIKHANI, Abolfazl. Investigation on Range Anxiety and Safety Buffer of Battery Electric Vehicle Drivers. **Journal of Advanced Transportation**, [S. l.], v. 2018, 2018. DOI: 10.1155/2018/8301209.

ZAP-MAP. **EV connector types**. 2020. Disponível em: <https://www.zap-map.com/charge-points/connectors-speeds/>. Acesso em: 28 ago. 2020.

ZEEV. **Zeev Energy in Motion**. 2019. Disponível em: <https://www.zeev.pt/>. Acesso em: 5 jun. 2020.

ZHANG, Xingping; XIE, Jian; RAO, Rao; LIANG, Yanni. Policy incentives for the adoption of electric vehicles across countries. **Sustainability (Switzerland)**, [S. l.], v. 6, n. 11, p. 8056–8078, 2014. DOI: 10.3390/su6118056.

ZUBI, Ghassan; DUFO-LÓPEZ, Rodolfo; CARVALHO, Monica; PASAOGLU, Guzay. The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 89, n. October 2017, p. 292–308, 2018. DOI: 10.1016/j.rser.2018.03.002.

Anexo A - Frota projetada de VEs por cenário

Tabela A.1 – Frota projetada de VEs. ¹

Ano	Frota circulante	M5*F(t)	Frota VEs Cenário Base	M10*F(t)	Frota VEs Cenário Moderado	M25*F(t)	Frota VEs Cenário Acelerado
2010	26.868.461	0,00000592	56	0,00000580	56	0,00000581	56
2011	28.746.312	0,00000990	286	0,00000973	281	0,00000974	282
2012	30.646.011	0,00001632	504	0,00001607	496	0,00001609	497
2013	32.735.467	0,00002665	879	0,00002631	868	0,00002633	869
2014	34.628.912	0,00004330	1.503	0,00004285	1.487	0,00004286	1.488
2015	35.721.183	0,00007009	2.497	0,00006954	2.477	0,00006955	2.478
2016	36.142.780	0,00011320	4.075	0,00011264	4.055	0,00011263	4.054
2017	36.582.991	0,00018251	6.649	0,00018217	6.637	0,00018214	6.636
2018	37.064.304	0,00029377	10.899	0,00029427	10.917	0,00029429	10.917
2019	37.666.063	0,00047201	17.779	0,00047482	17.885	0,00047512	17.896
2020	38.543.575	0,00075652	29.159	0,00076506	29.488	0,00076652	29.544
2021	39.688.770	0,00120812	47.949	0,00123032	48.830	0,00123554	49.037
2022	41.093.120	0,00191859	78.841	0,00197269	81.064	0,00198902	81.735
2023	42.747.772	0,00302081	129.133	0,00314850	134.591	0,00319590	136.618
2024	44.644.096	0,00469424	209.570	0,00498928	222.742	0,00511975	228.566
2025	46.827.120	0,00715337	334.972	0,00781919	366.150	0,00816318	382.258
2026	49.284.958	0,01059922	522.382	0,01205048	593.908	0,01292013	636.768
2027	52.004.431	0,01511912	786.261	0,01812123	942.384	0,02021719	1.051.383
2028	54.970.969	0,02056059	1.130.236	0,02633441	1.447.628	0,03109479	1.709.311
2029	58.168.831	0,02647403	1.539.963	0,03660577	2.129.315	0,04663695	2.712.817
2030	61.581.134	0,03222642	1.984.539	0,04825878	2.971.830	0,06755025	4.159.821

¹ Dados históricos entre o período de 2010 a 2018. Dados projetados a partir de 2019 até 2030.

Anexo B - Dados históricos de frota pedagiada Fernão Dias

Tabela B.1 – Dados históricos de frota pedagiada na Fernão Dias e relação entre frota pedagiada e frota circulante.²

Ano		2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	Média
Frota circulante		24.779.932	26.868.461	28.902.101	30.898.766	32.992.248	34.712.948	35.621.014	35.996.611	36.430.823	37.098.282	37.933.988	
P1 - Mairiporã	Frota pedagiada	0	4.985.683	15.948.891	16.755.247	17.277.086	18.603.066	19.055.457	18.729.099	18.986.519	18.535.475	19.247.303	18.126.460
	% na frota circ.	0,0%	18,6%	55,2%	54,2%	52,4%	53,6%	53,5%	52,0%	52,1%	50,0%	50,7%	52,6%
P2 - Vargem	Frota pedagiada	5.155.001	5.551.736	6.003.970	6.501.164	7.005.818	7.299.688	7.511.349	7.423.845	7.705.726	7.725.576	8.089.920	7.081.879
	% na frota circ.	20,8%	20,7%	20,8%	21,0%	21,2%	21,0%	21,1%	20,6%	21,2%	20,8%	21,3%	21,0%
P3 - Cambuí	Frota pedagiada	2.739.095	3.744.559	3.924.542	4.278.861	4.558.078	4.819.453	4.974.556	4.867.826	4.991.786	4.879.408	5.059.801	4.609.887
	% na frota circ.	11,1%	13,9%	13,6%	13,8%	13,8%	13,9%	14,0%	13,5%	13,7%	13,2%	13,3%	13,7%
P4 - São G. Sapucaí	Frota pedagiada	2.157.593	2.666.265	2.776.425	3.045.172	3.248.399	3.435.797	3.486.538	3.386.834	3.462.429	3.356.107	3.474.764	3.233.873
	% na frota circ.	8,7%	9,9%	9,6%	9,9%	9,8%	9,9%	9,8%	9,4%	9,5%	9,0%	9,2%	9,6%
P5 - Carmo da Cachoeira	Frota pedagiada	1.847.922	2.449.295	2.556.792	2.761.647	2.938.169	3.090.439	3.139.446	3.077.722	3.186.782	3.088.929	3.201.746	2.949.097
	% na frota circ.	7,5%	9,1%	8,8%	8,9%	8,9%	8,9%	8,8%	8,6%	8,7%	8,3%	8,4%	8,8%
P6 - Santo Ant. do Amparo	Frota pedagiada	1.969.284	2.110.320	2.212.162	2.397.487	2.553.895	2.687.606	2.723.993	2.668.012	2.753.889	2.700.142	2.780.432	2.505.202
	% na frota circ.	7,9%	7,9%	7,7%	7,8%	7,7%	7,7%	7,6%	7,4%	7,6%	7,3%	7,3%	7,6%
P7 - Carmópolis de Minas	Frota pedagiada	1.650.026	2.193.616	2.285.998	2.479.505	2.642.068	2.786.818	2.799.291	2.745.943	2.816.889	2.727.463	2.828.084	2.630.568
	% na frota circ.	6,7%	8,2%	7,9%	8,0%	8,0%	8,0%	7,9%	7,6%	7,7%	7,4%	7,5%	7,8%
P8 - Itatiaiuçu	Frota pedagiada	2.541.483	2.706.076	2.832.290	3.057.434	3.255.154	3.431.595	3.451.632	3.382.978	3.466.548	3.359.545	3.480.317	3.178.641
	% na frota circ.	10,3%	10,1%	9,8%	9,9%	9,9%	9,9%	9,7%	9,4%	9,5%	9,1%	9,2%	9,7%

² Para o cálculo da relação média entre frota pedagiada e frota circulante foram desconsiderados os dados referentes a 2009 das praças de pedágio P1, P2, P3, P4, P5 e P7, por não contemplarem todo o ano. Para a média da praça P1, os dados de 2010 também foram desconsiderados pelo mesmo motivo.

Anexo D - Relatório de dimensionamento PV Syst™

PVSYST V6.63		24/04/20	Page 1/3
Grid-Connected System: Simulation parameters			
Project :	Artigo		
Geographical Site	São Paulo	Country	Brazil
Situation	Latitude -23.55° S	Longitude	-46.64° W
Time defined as	Legal Time	Time zone	UT-3
	Albedo	Altitude	760 m
Meteo data:	São Paulo	Meteonorm 7.1 (1900-1900) - Synthetic	
Simulation variant :	Simulação 6000 kWp - A3a		
	Simulation date	24/04/20 09h40	
Simulation parameters			
Collector Plane Orientation	Tilt	23°	Azimuth 0°
30 Sheds	Pitch	5.20 m	Collector width 3.00 m
Inactive band	Top	0.05 m	Bottom 0.05 m
Shading limit angle	Gamma	26.48 °	Occupation Ratio 57.7 %
Models used	Transposition	Perez	Diffuse Perez, Meteonorm
Horizon	Free Horizon		
Near Shadings	Mutual shadings of sheds		
PV Array Characteristics			
PV module	Si-poly	Model	GCL-P6/96-430
Original PVsyst database	Manufacturer	GCL	
Number of PV modules	In series	11 modules	In parallel 1268 strings
Total number of PV modules	Nb. modules	13948	Unit Nom. Power 430 Wp
Array global power	Nominal (STC)	5998 kWp	At operating cond. 5378 kWp (50°C)
Array operating characteristics (50°C)	U mpp	491 V	I mpp 10954 A
Total area	Module area	36105 m²	Cell area 32538 m²
Inverter			
Original PVsyst database	Model	AGILO 100.0-3 Outdoor	
Characteristics	Manufacturer	Fronius International	
	Operating Voltage	460-820 V	Unit Nom. Power 100 kWac
Inverter pack	Nb. of inverters	50 units	Total Power 5000 kWac
PV Array loss factors			
Array Soiling Losses			Loss Fraction 3.0 %
Thermal Loss factor	Uc (const)	29.0 W/m²K	Uv (wind) 0.0 W/m²K / m/s
Wiring Ohmic Loss	Global array res.	0.76 mOhm	Loss Fraction 1.5 % at STC
Serie Diode Loss	Voltage Drop	0.7 V	Loss Fraction 0.1 % at STC
Module Quality Loss			Loss Fraction -0.8 %
Module Mismatch Losses			Loss Fraction 1.0 % at MPP
Incidence effect, ASHRAE parametrization	IAM = 1 - bo (1/cos i - 1) bo	Param. 0.05	
System loss factors			
AC loss, transfo to injection	Grid Voltage	44 kV	
	Wires: 3x30000.0 mm²	200 m	Loss Fraction 0.0 % at STC
External transformer	Iron loss (Night disconnect)	5766 W	Loss Fraction 0.1 % at STC
	Resistive/Inductive losses	3357.6 mOhm	Loss Fraction 1.0 % at STC
User's needs :	Unlimited load (grid)		

Figura D.1 – Relatório de dimensionamento de UFV 5 MW – folha 1.

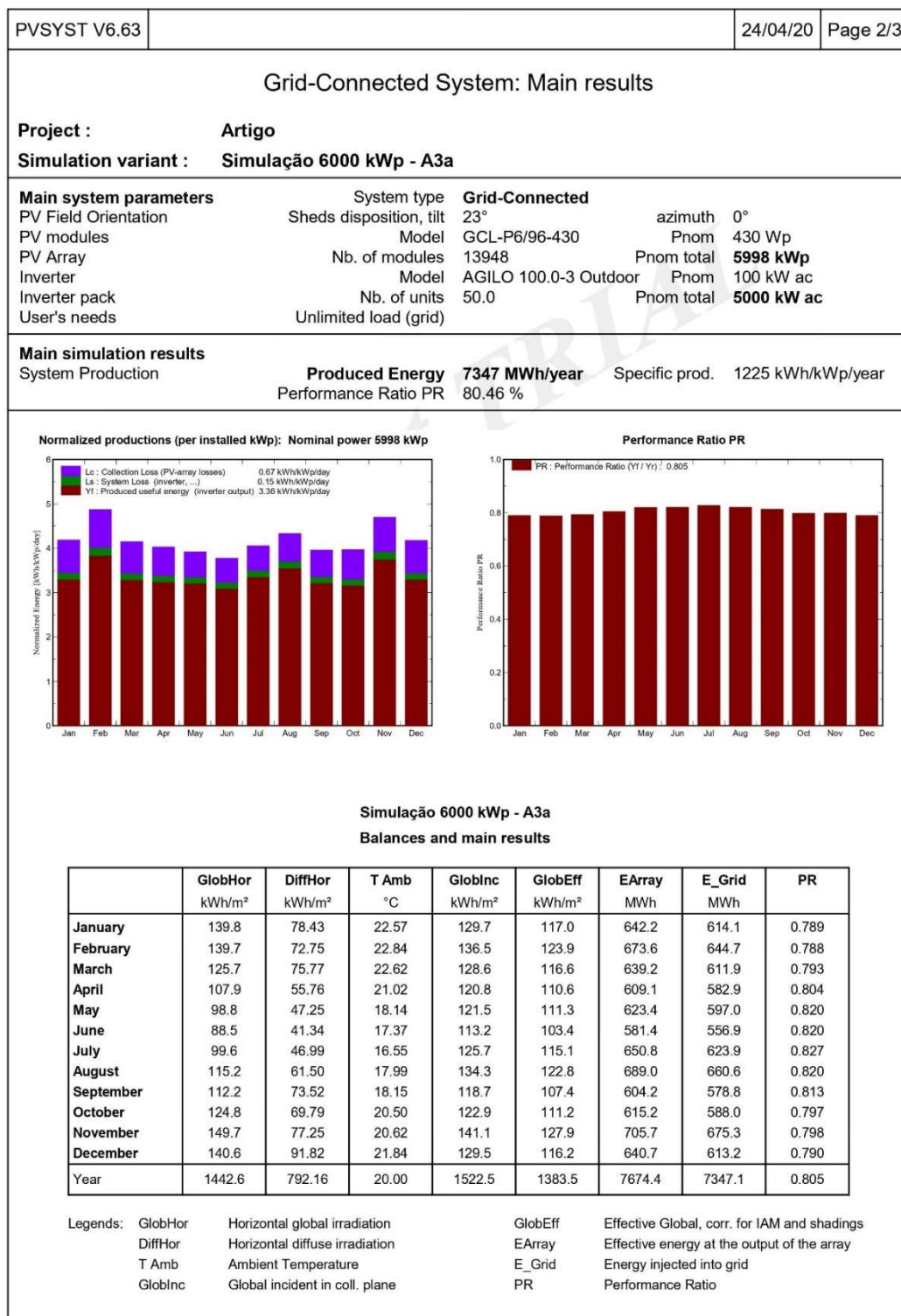
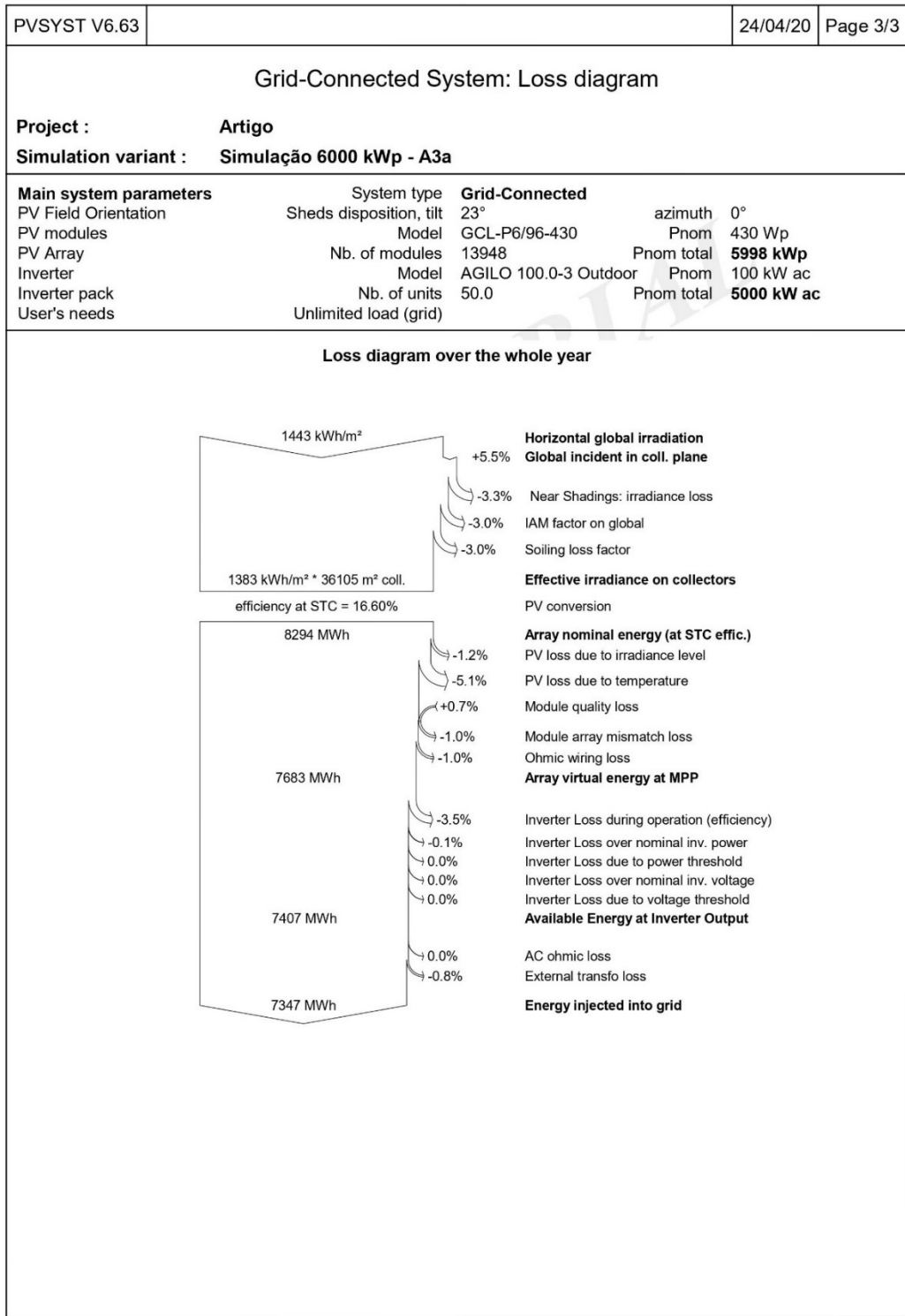


Figura D.2 – Relatório de dimensionamento de UFV 5 MW – folha 2.



PVsystem Evaluation mode

Figura D.3 – Relatório de dimensionamento de UFV 5 MW – folha 3.

Anexo E – Fluxo de caixa descontado

Tabela E.1 – Dados de entrada para fluxo de caixa descontado SV1 base.

SV1	Base	
Energia recarregada	16.541	MWh/ano
CAPEX	R\$ 52.841.351,20	
OPEX	R\$ 4.246.983,99	ano
Depreciação	5%	
TRIBUTOS		
PIS/COFINS	3,65%	
ISS	2,00%	
Imposto de renda	8,00%	
Contribuição social	2,88%	
RESULTADOS		
Tarifa de recarga	697,73	R\$/MWh
TIR real de projeto	10,00%	
Margem EBITDA	61,0%	

Tabela E.2 – Fluxo de caixa descontado SV1 Base.³

PERÍODO	Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9	Ano 10	Ano 11	Ano 12	Ano 13	Ano 14	Ano 15	Ano 16	Ano 17	Ano 18	Ano 19	Ano 20
RECEITA BRUTA	R\$ -	11,54	11,54	11,54	11,54	11,54	11,54	11,54	11,54	11,54	11,54	11,54	11,54	11,54	11,54	11,54	11,54	11,54	11,54	11,54	11,54
PIS / COFINS	R\$ -	-0,42	-0,42	-0,42	-0,42	-0,42	-0,42	-0,42	-0,42	-0,42	-0,42	-0,42	-0,42	-0,42	-0,42	-0,42	-0,42	-0,42	-0,42	-0,42	-0,42
ISS	R\$ -	-0,23	-0,23	-0,23	-0,23	-0,23	-0,23	-0,23	-0,23	-0,23	-0,23	-0,23	-0,23	-0,23	-0,23	-0,23	-0,23	-0,23	-0,23	-0,23	-0,23
Deduções da Receita Bruta	R\$ -	-0,65	-0,65	-0,65	-0,65	-0,65	-0,65	-0,65	-0,65	-0,65	-0,65	-0,65	-0,65	-0,65	-0,65	-0,65	-0,65	-0,65	-0,65	-0,65	-0,65
Receita Líquida	R\$ -	10,89	10,89	10,89	10,89	10,89	10,89	10,89	10,89	10,89	10,89	10,89	10,89	10,89	10,89	10,89	10,89	10,89	10,89	10,89	10,89
OPEX	R\$ -	-4,25	-4,25	-4,25	-4,25	-4,25	-4,25	-4,25	-4,25	-4,25	-4,25	-4,25	-4,25	-4,25	-4,25	-4,25	-4,25	-4,25	-4,25	-4,25	-4,25
EBITDA	R\$ -	6,64	6,64	6,64	6,64	6,64	6,64	6,64	6,64	6,64	6,64	6,64	6,64	6,64	6,64	6,64	6,64	6,64	6,64	6,64	6,64
Margem EBITDA	R\$ -	61,0%	61,0%	61,0%	61,0%	61,0%	61,0%	61,0%	61,0%	61,0%	61,0%	61,0%	61,0%	61,0%	61,0%	61,0%	61,0%	61,0%	61,0%	61,0%	61,0%
Depreciação e Amortização	R\$ -	-2,64	-2,64	-2,64	-2,64	-2,64	-2,64	-2,64	-2,64	-2,64	-2,64	-2,64	-2,64	-2,64	-2,64	-2,64	-2,64	-2,64	-2,64	-2,64	-2,64
EBIT	R\$ -	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
Imposto sobre lucro - IR / CS	R\$ -	-0,44	-0,44	-0,44	-0,44	-0,44	-0,44	-0,44	-0,44	-0,44	-0,44	-0,44	-0,44	-0,44	-0,44	-0,44	-0,44	-0,44	-0,44	-0,44	-0,44
LUCRO LÍQUIDO	R\$ -	3,56	3,56	3,56	3,56	3,56	3,56	3,56	3,56	3,56	3,56	3,56	3,56	3,56	3,56	3,56	3,56	3,56	3,56	3,56	3,56
FLUXO DE CAIXA TOTAL REAL		-53,73	6,21	6,21	6,21	6,21	6,21	6,21	6,21	6,21	6,21	6,21	6,21	6,21	6,21	6,21	6,21	6,21	6,21	6,21	6,21

³ Valores contábeis em 10⁶ R\$.