



Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Departamento de Engenharia Elétrica



Trabalho de Conclusão de Curso

Carregamento Ótimo de VEs em Redes de Distribuição de Baixa Tensão

Caique Sulivam Cordeiro Costa

João Monlevade, MG
2019

Caique Sulivam Cordeiro Costa

**Carregamento Ótimo de VEs em Redes de
Distribuição de Baixa Tensão**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto.
Orientador: Prof. Dr. Juan Carlos Galvis Manso

Universidade Federal de Ouro Preto
João Monlevade
2019

C837c

Costa, Caique Sulivam Cordeiro.

Carregamento ótimo de VEs em redes de distribuição de baixa tensão
[manuscrito] / Caique Sulivam Cordeiro Costa. - 2019.

56f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Juan Carlos Galvis Manso.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de
Ciências Exatas e Aplicadas. Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Veículos elétricos. 2. Redes elétricas. 3. Algoritmos genéticos. 4.
Programação linear. I. Manso, Juan Carlos Galvis. II. Universidade Federal de
Ouro Preto. III. Título.

CDU: 621.313

Catálogo: ficha.sisbin@ufop.edu.br



FOLHA DE APROVAÇÃO

Caique Sulivam Cordeiro Costa

Carregamento Ótimo de VEs em Redes de
Distribuição de Baixa Tensão

Membros da banca

Carlos Henrique Nogueira de Resende Barbosa - Doutor - Universidade Federal de Ouro Preto
Thais de Fatima Araujo Silva - Doutora - Universidade Federal de Ouro Preto
Juan Carlos Galvis Manso - Doutor - Universidade Federal de Ouro Preto

Versão final

Aprovado em 25 de novembro de 2019

De acordo

Juan Carlos Galvis Manso



Documento assinado eletronicamente por **Juan Carlos Galvis Manso, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 20/12/2019, às 15:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0030124** e o código CRC **98A5AE18**.

Agradecimentos

Agradeço:

À Deus em primeiro lugar, por ter me dado sabedoria e força nos momentos difíceis.

Aos meus pais José Luis e Maura, por terem me incentivado a estudar e me dado apoio ao longo desse caminho, pois sem eles eu não teria chegado até aqui.

Aos meus irmãos, Caio, Camila e Cauan, por terem sempre me apoiado em todos os momentos.

À minha namorada, Ana Beatriz, que acompanhou toda a minha trajetória e esteve comigo nos momentos bons e me deu forças nos momentos difíceis.

Aos meus avós José Cordeiro e Maria de Fátima, por terem me dado suporte em uma etapa da minha vida que foi fundamental para essa conquista, assim como meus tios Ana Bárbara e Ivair.

À minha avó, Margarida (em memória) de forma especial, que sempre teve carinho por mim e meus irmãos e que sonhava em me ver formado.

Aos demais familiares e amigos que sempre estiveram presentes e desejaram o melhor para mim.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Juan, por toda a paciência e sabedoria, permitindo que a realização deste trabalho fosse possível.

*"A felicidade pode ser encontrada mesmo nas horas mais difíceis, se você lembrar de
acender a luz."
– Alvo Dumbledore*

Resumo

O uso de veículos elétricos está se tornando cada vez mais comum devido ao avanço das tecnologias utilizadas nos mesmos e pela preocupação relacionada à emissão de gases poluentes na atmosfera e à dependência do petróleo. No entanto, a adoção generalizada de veículos elétricos pode causar impactos no sistema de distribuição de energia se o carregamento não for realizado de forma controlada. Alguns efeitos incluem sobrecarga nos transformadores e quedas de tensão excessiva nas barras do sistema. Neste contexto, podem ocorrer principalmente em horários de pico para o sistema elétrico. Este trabalho demonstra como o carregamento dos veículos elétricos pode ser feito de forma controlada e otimizada sem ultrapassar os limites de operação do sistema. Para este propósito foram implementadas duas estratégias. Na primeira estratégia foi utilizada uma técnica baseada em programação linear, que determina o nível de carregamento ideal para cada veículo elétrico, a fim de maximizar a potência entregue aos veículos enquanto a rede opera dentro do limite aceitável. O modelo de otimização utilizado foi testado em uma rede de distribuição de baixa tensão monofásica com 45 barras e 22 veículos elétricos, nos quais apenas um veículo elétrico está conectado em cada barra. Os resultados mostraram que com a otimização, a rede opera dentro dos limites de restrição, não sendo necessário uma atualização da infraestrutura existente. O segundo método empregado utiliza o Algoritmo Genético com o objetivo de diminuir a relação demanda média e demanda máxima de carga do transformador que alimenta um setor industrial, no qual está conectado à um sistema de distribuição de 11 kV e 36 barras. A otimização é aplicada no estacionamento deste setor, onde são feitos os carregamentos dos veículos elétricos. Os resultados mostraram que a curva de carga pode se tornar mais suave e linear, deixando o sistema mais ou menos carregado, de acordo com os níveis de penetração de veículos elétricos no sistema.

Palavras-chave: Veículos elétricos, Carregamento, Controle, Otimização, Programação, Linear, Algoritmo Genético.

Abstract

Nowadays electric vehicles are becoming common, due to the high-tech used in them, the concern about the emission of pollutant gases in the atmosphere and also less dependence on oil. However the accelerated increase of electrical vehicles can cause damage on the power distribution system if the charging is not performed in a controlled way. Some side effects are overload on transformers and excessive voltage drops on the system bars which mainly occur at peak time. This work demonstrates how electric vehicle transport can be controlled and optimized without exceeding system operating limits. To achieve the purpose, two strategies were implemented. The first strategy was based on a linear programming technique that determines the optimum usage level for each electric vehicle, intending to maximize power limit and power supplied to the vehicles while the system operates within the acceptable limit. The optimization model used was tested on a 45-bar single-phase low-voltage distribution network with 22 electric vehicles, where only one is connected to each bar. The results showed that with optimization, a network works inside the constraint limits, so there is not necessary to upgrade the infrastructure. The second method uses the Genetic Algorithm with the objective of flattening and decreasing the peaks of the distribution system load curve of a transformation that feeds an industrial session whose is connected to a distribution system of 11kV and 36 bars . The optimization is applied in the parking lot of this sector, where the electric vehicles are charged. The results showed that the charge curve can become smoother and more linear, leaving the system more or less charged according to the electric vehicle penetration levels in the system.

Keywords: Electric Vehicles, Charging, Control, Optimization, Linear Programming, Genetic Algorithm.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Arquitetura Híbrida Série-Paralelo.	8
Figura 2 – Arquitetura PHEV Série.	10
Figura 3 – Arquitetura PHEV Paralelo.	10
Figura 4 – Arquitetura PHEV com Potencia Dividida.	11
Figura 5 – Modo de Operação do PHEV.	13
Figura 6 – Veículo Elétrico à Bateria.	13
Figura 7 – Conector SAE J1772.	17
Figura 8 – Pinos do Conector SAE J1772.	18
Figura 9 – DuraStation™: o Carregador de Veículos Elétricos da GE	19
Figura 10 – Equipamento de Carga Rápida.	20
Figura 11 – Diagrama Unifilar do sistema elétrico.	21
Figura 12 – Diagrama Unifilar de uma rede de baixa tensão.	22
Figura 13 – Circuito equivalente de uma linha de transmissão curta com um gerador e uma carga.	23
Figura 14 – Curva diária de demanda residencial.	24
Figura 15 – Modelo Físico.	30
Figura 16 – Metodologia para otimização do carregamento.	33
Figura 17 – Cromossomo.	35
Figura 18 – FSM.	36
Figura 19 – Criação da População Inicial.	37
Figura 20 – Processo de Seleção.	38
Figura 21 – Processo de Cruzamento.	38
Figura 22 – Mutação.	39
Figura 23 – Fluxograma do Algoritmo Genético.	40
Figura 24 – Sistema Elétrico do Modelo 1.	42
Figura 25 – Cenários de Carga do Transformador.	43
Figura 26 – Carregamento dos VEs.	44
Figura 27 – Variação de Tensão com Limites de $\pm 10\%$	45
Figura 28 – Variação de Tensão com Limites de $\pm 2\%$	45
Figura 29 – Sistema Elétrico do Modelo 2.	46
Figura 30 – Curvas de Cargas para Diferentes Níveis de Penetração.	47
Figura 31 – Curvas de Carga do Sistema.	48
Figura 32 – Curvas de Carga com Níveis de Carga pré-estabelecidos.	49

Lista de Siglas

VE	Veículo Elétrico
ICEV	Internal Combustion Engine Vehicles (Veículos com Motor à Combustão Interno)
ICE	Internal Combustion Engine (Motor à Combustão Interno)
CS	Charge-Sustaining mode (Modo Sustentação de Carga)
CD	Charge-Depleting mode (Modo Exaustão de Carga)
CA	Corrente Alternada
VCA	Volts Corrente Alternada
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle (Veículo Elétrico Híbrido plug in)
BEV	Battery Electric Vehicle (Veículo Elétrico à Bateria)
AMI	Advanced Metering Infrastructure (Infra-Estrutura de Medição Avançada)
SOC	State of Charge (Nível de Carga)
AG	Algoritmo Genético

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação	1
1.2	Revisão Bibliográfica	2
1.3	Objetivos	5
2	VEÍCULOS ELÉTRICOS	6
2.1	Introdução	6
2.2	Veículos Elétricos Disponíveis no Mercado	7
2.2.1	Veículo Elétrico Híbrido	7
2.2.1.1	Arquitetura Híbrida Série-Paralelo	8
2.2.2	Veículo Elétrico Híbrido do tipo Plug In (PHEV).	9
2.2.2.1	Arquitetura PHEV Série	9
2.2.2.2	Arquitetura PHEV Paralelo	9
2.2.2.3	Arquitetura PHEV com Potência dividida	11
2.2.2.4	Gerenciamento de Energia e Modos de Operação do PHEV	11
2.2.3	Veículo Elétrico à Bateria (BHEV)	12
2.3	Baterias	14
2.3.1	Tipos de Baterias	14
2.3.1.1	Chumbo-Ácido (Pb)	14
2.3.1.2	Níquel-Hidreto Metálico	14
2.3.1.3	Íons de Lítio	14
2.3.2	Especificações de Alguns Tipos de Baterias	15
2.3.3	Vida útil das baterias	16
2.4	Carregamento de Veículos Elétricos	16
2.4.1	Métodos de carregamento dos VEs	16
2.4.1.1	Nível 1 de carga	17
2.4.1.2	Nível 2 de carga	18
2.4.1.3	Nível 3 de carga	18
2.4.1.4	Troca da Bateria	19
3	REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE BAIXA TENSÃO	21
3.1	Redes de Baixa Tensão	21
3.1.1	Modelo Linha Curta	22
3.1.2	Modelagem da Carga	23
3.1.3	Fator de Potência	23
3.1.4	Transformador	24

4	MODELAGEM MATEMÁTICA DO CARREGAMENTO DE VES	25
4.1	Modelo de Otimização 1	25
4.2	Modelo de Otimização 2	28
4.2.1	Comportamento Diário	28
4.2.2	Aplicação do Modelo	29
5	METODOLOGIA	32
5.1	Programação Linear	32
5.1.1	Metodologia Utilizada para o Modelo 1	32
5.2	Algoritmo Genético para o Carregamento de VEs	35
5.2.1	Representação do Cromossomo	35
5.2.2	Inicialização Heurística	36
5.2.3	Algoritmo Genético para o Carregamento de VEs	37
5.2.3.1	Seleção	37
5.2.3.2	Cruzamento	38
5.2.3.3	Mutação	39
5.2.3.4	Elitismo	39
5.2.3.5	Convergência do Algoritmo Genético	40
6	RESULTADOS	42
6.1	Resultados para o Modelo 1	42
6.2	Resultados para o Modelo 2	46
7	CONCLUSÃO	50
	REFERÊNCIAS	51
	APÊNDICE A – DADOS DO SISTEMA DO MODELO 1	53
	APÊNDICE B – DADOS DO SISTEMA DO MODELO 2	55

1 Introdução

Desde a criação dos carros tradicionais à combustão, o mercado de veículos cresceu muito desde então, tendo hoje milhões de unidades em circulação. Esse mercado ficou totalmente dependente do petróleo. Esses veículos emitem gases poluentes na atmosfera e tinham um baixo rendimento: pequena parte da energia contida no combustível é convertida como força de tração do veículo. O veículo com motor à combustão interna, emite gases gerados na combustão interna do motor que podem causar diversos problemas à saúde humana e ao meio ambiente, tais como o CO_2 , óxido nitroso, e cloro-fluorocarbonatos, que prejudicam a população criando um consentimento para diminuir os efeitos do aquecimento global (OSORIO, 2013).

A total dependência do petróleo pode ser ruim pelo fato de que qualquer crise nesse setor pode desencadear problemas muito grandes como: grande aumento do preço dos combustíveis, paralisação no setor de transporte, que pode causar problemas de fornecimento de alimentos e produtos básicos para a sobrevivência das pessoas. Outro problema que merece ser destacado trata da capacidade das reservas de petróleo, que não é um recurso renovável e em um certo momento vai se esgotar.

Tendo em mente esses problemas, o incentivo para o uso de VEs (Veículos Elétricos) está em constante crescimento, se tornando uma alternativa aos veículos tradicionais à combustão.

1.1 Motivação

A penetração de VEs, no século XXI, vem crescendo rapidamente, devido a sua maior eficiência e por emitir menos gases poluentes do que os veículos com motor a combustão interna. Os VEs utilizam baterias para fornecer energia para os motores elétricos, portanto essas precisam ser recarregadas. Se forem recarregados uma grande quantidade de VEs no sistema de distribuição, esse carregamento pode produzir grandes variações de carga no sistema elétrico levando a quedas excessivas de tensões nas barras do sistema e sobrecarga nos transformadores.

É necessário avaliar os impactos causados ao sistema de distribuição de energia, levando em conta a localidade dos pontos de carregamento dos VEs, horário de carregamento, velocidade da carga associada à taxa de carregamento e às características da bateria.

1.2 Revisão Bibliográfica

O artigo de II, Wang e Alam (2010) teve o objetivo de controlar e medir o impacto que os PHEVs (*do inglês: Plug-in Hybrid Electric Vehicle*) causam no sistema de distribuição de energia. Foi utilizado um sistema de medição avançada e um sistema Multi-Agente, que são sistemas que exibem um comportamento autônomo mas ao mesmo tempo interagem com outros agentes do sistema. Foi utilizado como teste um alimentador de 25 kVA onde estavam conectadas cinco casas. Foi apresentada uma visão geral de como medir e modelar o impacto de PHEVs no sistema de distribuição de energia. Esses impactos são construídos pela combinação de padrões como: características de carregamento, tempo de carga e nível de penetração. Eles concluíram, que o carregamento dos PHEVs deve ser coordenado através de operadores e outros sistemas multi-agente, a fim de manter a integridade do sistema de distribuição, reduzindo a perda de energia e a queda de tensão excessiva nos barramentos do sistema de distribuição de energia.

O trabalho de Papadopoulos (2012) abordou os impactos causados pelo carregamento de VEs no sistema de distribuição de baixa tensão e elaborou um sistema de controle que coordena a taxa de carregamento dos VEs. Foram utilizadas técnicas de abordagem determinística e probabilística e conceito de Multi-Agente hierárquico. O sistema de teste foi baseado nos sistemas de distribuição do Reino Unido e Espanha. Foi concluído pelo autor, a necessidade de controle de carregamento, baseado nos horários de pico ou pelo preço da energia em determinados horários. Em alguns casos viu-se a necessidade de atualizações na infraestrutura da rede ou o uso da tecnologia V2G (*do inglês: Vehicle to Grid*).

O trabalho de Richardson, Flynn e Keane (2012) teve como objetivo demonstrar como o controle do carregamento de veículos elétricos pode levar à melhor utilização da rede de distribuição de energia de baixa tensão. A técnica empregada foi baseada na programação linear e foi estudada uma função objetivo ponderada que otimiza as taxas de carregamento de acordo com o impacto nas condições de operação. A rede teste foi baseada em um sistema de distribuição residencial de baixa tensão em uma área suburbana de Dublin, na Irlanda. Os resultados mostraram que a maximização das potências entregue aos veículos favorece os veículos que estão conectados próximos ao transformador, em detrimento daqueles que estão conectados no extremo da rede radial.

O trabalho de Hu (2014) tratou o desenvolvimento de estratégias de controle para integração em grande escala de veículos elétricos na rede de distribuição de energia. Levou-se em conta a hipótese de que é possível agendar o carregamento de VEs de acordo com as condições do sistema e da energia necessária aos usuários para realizar o carregamento. O carregamento do veículo foi feito de forma programada de acordo com as condições da rede. Houve uma troca de informações entre a distribuidora e o operador de carregamento. O preço da eletricidade no momento de carregamento do VE foi previsto. Os proprietários de VEs foram incentivados a enviar um plano de utilização de seus VEs no

dia seguinte. O controle de preços é a forma mais atraente para regular o carregamento de VEs considerando sua implementação mais fácil.

O artigo de Aljanad e Mohamed (2015) ilustrou os impactos que os PEVs causam no sistema de distribuição. No entanto, o uso da tecnologia V2G (*do inglês: Vehicle to Grid*) em conjunto com os PHEVs poderia fornecer potência para a rede, garantindo que a demanda não exceda a capacidade de geração. Foram usados como testes sistemas de distribuição de Portugal, Suécia e Estados Unidos, citando o que aconteceria ao sistema à determinados níveis de penetração de VEs. Eles concluíram que a limitação da rede pode ser resolvida controlando o tempo de carregamento dos VEs.

O trabalho de Ul-Haq et al. (2015) teve como objetivo analisar os desequilíbrios de tensão na rede de baixa tensão causados pela introdução do carregamento de VEs. Foi implementado um modelo de carregamento no Simulink (Matlab), controlado por um conversor DC/DC. O teste foi aplicado em uma rede de baixa tensão baseado no CIGRE LV European. O autor concluiu que empregando taxas de carregamento baseadas em tarifas, há um desequilíbrio de tensão dentro dos limites permitidos.

O artigo de Tan, Ramachandaramurthy e Yong (2016) teve como objetivo a otimização do sistema V2G para minimizar os impactos causados pelo VEs ao sistema de distribuição de energia. Eles utilizaram o Algoritmo Genético (GA) e a Otimização de Nuvem de Partículas (PSO) para resolver o problema de otimização. Eles concluíram que a tecnologia V2G é uma perspectiva convincente que pode trazer benefícios ambientais e minimizar os impactos causados ao sistema de distribuição de energia.

No artigo de Jayashree, Malarvizhi e Pradeep (2017) o impacto da penetração de VEs em um sistema de distribuição residencial foi discutido e analisado. Vários esquemas de carregamento, padrões e características de baterias de veículos foram estudados. Os resultados mostraram que a eficiência do transformador é diminuída quando está sobrecarregado. Uma solução viável para reduzir a sobrecarga do transformador, proposta pelos autores, incluiu as técnicas de controle de carga doméstica e controle de carregamento.

O artigo de Reddy, Goswami e Choudhury (2018) avaliou os impactos da conexão de VEs no sistema de distribuição de energia e propuseram métodos como utilização de placas fotovoltaicas e tecnologia V2G para geração de energia. Foram utilizados dois sistemas de distribuição como teste. O primeiro consistiu em uma área residencial urbana e o segundo consistiu em uma área residencial e industrial. Os resultados mostraram que a confiabilidade do sistema é melhorada para cada uma das soluções sugeridas.

O trabalho de Mehta et al. (2018) teve como objetivo analisar e controlar o impacto do carregamento dos VEs causado ao sistema de distribuição de energia elétrica de baixa tensão, usando uma tecnologia G2V (*do inglês: Grid to Vehicle*), baseada no método de algoritmo genético. O sistema de teste foi um estacionamento de um setor industrial. Conclui-se nesse trabalho que as duas técnicas empregadas, estratégia de carregamento A e B, tem vantagens individuais, pois uma reduz o custo diário total e a

outra fornece benefícios técnicos significativos em termos de redução de carregamento do sistema respectivamente.

Na Tabela 1, a revisão bibliográfica é mostrada de forma simplificada com os objetivos e métodos de cada autor.

Tabela 1 – Resumo bibliográfico

Autor	Objetivo	Método
Il, Wang e Alam (2010)	Controlar e medir o impacto que os PHEVs causam no sistema de distribuição de energia.	Utiliza um sistema de medição avançada e sistema Multi-Agente.
Papadopoulos (2012)	Elaborar e desenvolver um sistema de controle que coordena a taxa de carregamento dos VEs.	Utiliza técnicas de abordagem determinística e probabilística e o conceito de Multi-Agente hierárquico.
Richardson, Flynn e Keane (2012)	Demonstrar como o controle do carregamento de veículos elétricos pode levar à uma melhor utilização da rede de distribuição de energia.	Baseado na Programação Linear.
Hu (2014)	Desenvolver estratégias de controle para integração em grande escala de veículos elétricos na rede de distribuição de energia.	O carregamento do veículo é feito de forma programada de acordo com as condições da rede naquele momento.
Ul-Haq et al. (2015)	Analisar os desequilíbrios de tensão na rede de baixa tensão causados pela introdução do carregamento de VEs.	Baseado no Modelo de carregamento implementado no Simulink (Matlab) controlado através de um conversor DC/DC.
Aljanad e Mohamed (2015)	Ilustrar os impactos que os PEVs causam no sistema de distribuição.	Uso da tecnologia V2G em conjunto com os PHEVs.
Tan, Ramachandaramurthy e Yong (2016)	Otimizar o sistema V2G para minimizar os impactos causados pelo VEs ao sistema de distribuição de energia.	Uso da técnica de otimização do algoritmo V2G: Genetic Algorithm (GA) e Particle Swarm Optimization (PSO).

Jayashree, Marlarvizhi e Pra-deep (2017)	Discutir e analisar o impacto da penetração de VEs em um sistema de distribuição residencial.	Estudo de vários esquemas de carregamento, padrões e características de baterias de veículos.
Reddy, Goswami e Choudhury (2018)	Avaliar os impactos da conexão de VEs no sistema de distribuição de energia.	Utilização de placas fotovoltaicas e tecnologia V2G.
Mehta et al. (2018)	Analisar e controlar o impacto causado pelo carregamento de VEs, ao sistema de distribuição de energia elétrica de baixa tensão.	Tecnologia G2V (grid to vehicle), baseada no método de algoritmo genético.

Fonte: Do autor.

1.3 Objetivos

- Otimizar e controlar o carregamento de VEs, utilizando um modelo de programação linear, de modo que os limites operacionais do sistema não sejam excedidos.
- Otimizar e controlar o carregamento de VEs, utilizando o Algoritmo Genético, de modo que a curva de carga do sistema se torne mais suave e linear.
- Utilizar o programa de execução de fluxo de potência, denominado OpenDSS, para obter os parâmetros necessários para modelar o sistema de forma matricial e utilizar na função de programação linear do Matlab.
- Utilizar o OpenDSS, a partir da curva de carga obtida como resultado do Algoritmo Genético, e comparar os resultados de um sistema controlado e não controlado.

2 Veículos Elétricos

Neste capítulo, apresenta-se uma breve introdução à história dos VEs e as estruturas e arquiteturas atualmente utilizadas para os VEs. Posteriormente, são descritos os tipos de baterias utilizados e seus sistemas de carregamento.

2.1 Introdução

A história dos veículos elétricos tem início em meados do século XIX e está diretamente relacionada à história das baterias. Em 1859, o belga Gaston Planté realizou a demonstração da primeira bateria de chumbo e ácido que veio a ser utilizada por vários VEs a partir de 1880 na França, Reino Unido e EUA. Em 1885, Benz demonstrou o primeiro motor à combustão. Em 1901, Thomas Edison, acreditando no potencial dos VEs, desenvolveu a bateria de níquel-ferro com capacidade de armazenamento 40% superior do que a bateria de chumbo e ácido, porém seu custo era mais elevado (BARAN; LEGEY, 2010).

Além das baterias, duas tecnologias foram desenvolvidas para melhorar a autonomia dos VEs: a frenagem regenerativa, um equipamento capaz de transformar a energia cinética dos VEs em movimento em energia elétrica durante a frenagem e o sistema híbrido que consistia no uso de um motor elétrico juntamente com um motor à combustão (BARAN; LEGEY, 2010).

Em 1903, cerca de 20% dos veículos em circulação na cidade de Nova York eram de carros elétricos. Porém em 1912, o uso dos VEs seguiu em forte queda, o número de automóveis à gasolina era cerca de 30 vezes maior do que os de VEs. Os principais fatos para a queda do uso de VEs foram:

- O sistema de produção em série de automóveis desenvolvido por Henry Ford, permitiu um preço final dos veículos entre US\$ 500 e US\$ 1000 dólares, o que correspondia à metade do preço dos VEs naquela época.
- A invenção da partida elétrica para os veículos à combustão que eliminou a manivela utilizada para dar a partida nos motores.
- As rodovias dos EUA em 1990 já interligavam diversas cidades, o que exigia veículos que pudessem percorrer longas distâncias.
- A descoberta de petróleo no Texas reduziu o preço nos combustíveis, o que acabou se tornando um incentivo ao uso de veículos à combustão.

Somente após a década de 1960, quando a opinião pública começou a ser voltar para os problemas ambientais que os VEs voltaram a chamar a atenção das montadoras.

A partir de 1980, o conceito de desenvolvimento sustentável ganhava força e se concentrava na necessidade de utilização de fonte de energia alternativa e no desenvolvimento de novas tecnologias de transporte.

A Honda, em 1999, foi a primeira a lançar um veículo híbrido no mercado americano, o Insight, que foi um sucesso imediato. No ano 2000, também chegou ao mercado americano o Toyota Prius, obtendo um sucesso inesperado, o que acabou também acontecendo no mercado europeu mais tarde (BARAN; LEGEY, 2010).

Diversos tipos de veículos elétricos estão sendo desenvolvidos no mundo inteiro por diversas montadoras, tais como Honda e Toyota, visando ter um bom aproveitamento no futuro deste mercado que tem um potencial muito grande de crescimento nos próximos anos. Essa tecnologia dos novos VEs são fundamentais para diminuir a emissão de poluentes na atmosfera e reduzir a dependência de combustíveis fósseis.

Os VEs tem uma tecnologia limitada, devido às questões relacionadas à bateria como taxa de carregamento, autonomia, impacto ambiental dos materiais das baterias, durabilidade e segurança. Por isso, é importante analisar o impacto desses veículos em grandes quantidades em um cenário mundial. No entanto, o investimento em pesquisas sobre os impactos dos VEs tem sido muito grande.

A China também está investindo nessa tecnologia, visando diminuir a emissão de poluentes para melhorar a qualidade do ar. Em Pequim, foi criado o “13º Plano Quinquenal” que oferece subsídios à compra de novos VEs. Inicialmente, o incentivo concentra-se em táxis elétricos, ônibus elétricos, caminhões de saneamento básico elétrico e veículos elétricos para aluguel (MA et al., 2017).

2.2 Veículos Elétricos Disponíveis no Mercado

Nesta seção, serão abordados alguns tipos de VEs disponíveis atualmente no mercado e as arquiteturas correspondentes: o veículo elétrico híbrido, o veículo elétrico híbrido plug-in (o termo plug-in se refere ao conector elétrico para realizar o carregamento da bateria) e o veículo elétrico somente à bateria.

2.2.1 Veículo Elétrico Híbrido

É um veículo com motor à combustão interna que funciona em conjunto com um motor elétrico para reduzir o esforço do motor à combustão e, conseqüentemente, reduzir a emissão de poluentes e ocasionar um menor consumo de combustível. Nesse caso, a bateria não precisa ser carregada por fontes externas. Isso é feito pela própria inércia do veículo durante uma frenagem ou em momentos de desaceleração, convertendo energia

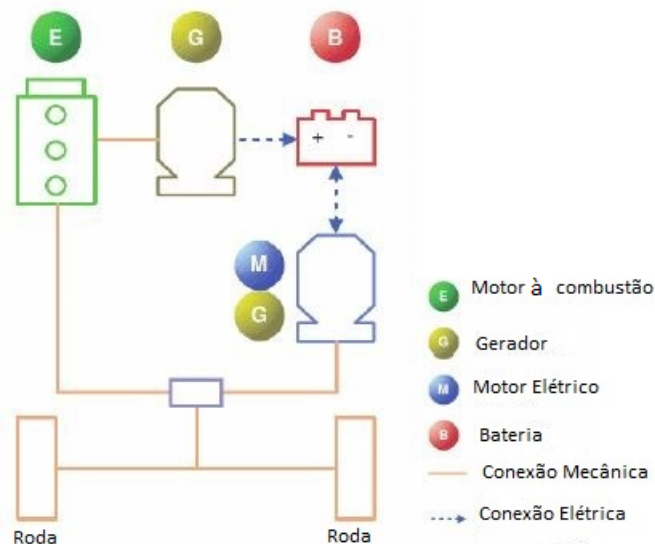
cinética em elétrica para o carregamento da bateria. Essa sincronia entre motor elétrico e motor à combustão é controlada por um sistema eletrônico que decide qual dos motores usar sob diversas situações.

São abordados aqui três tipos de classificações para a arquitetura sistema de potência: híbrida série, híbrida paralelo e híbrida série-paralelo. Esta classificação depende da disposição dos elementos fundamentais para movimentar o veículo. Menciona-se neste texto a arquitetura híbrida série-paralelo, devido à maior importância, pois é a mais eficiente e tem uma maior autonomia, e por ser a arquitetura mais utilizada pelos fabricantes de VEs (OSORIO, 2013).

2.2.1.1 Arquitetura Híbrida Série-Paralelo

Essa arquitetura, mostrada na Figura 1, é a combinação das arquiteturas híbrida série e paralelo. O motor à combustão está conectado diretamente às rodas, onde uma parte da energia é destinada às rodas e outra parte ao motor elétrico (operando como gerador) para auxiliar o carregamento da bateria. Há uma conexão mecânica que liga o motor à combustão ao gerador para realizar o carregamento da bateria ou para fornecer energia ao motor elétrico diretamente.

Figura 1 – Arquitetura Híbrida Série-Paralelo.



Fonte: adaptado de Esposito (2008).

Este tipo de arquitetura tem diferentes formas de operação, utilizando as vantagens de cada uma das arquiteturas de acordo com a necessidade durante o deslocamento. Porém, essa configuração tem uma complexidade e um custo maior em relação às outras arquiteturas individuais (série e paralelo). Como esse sistema garante um nível de

autonomia superior e reduz consideravelmente o consumo de combustível e a emissão de poluentes, este modelo é o mais bem visto pelos fabricantes.

2.2.2 Veículo Elétrico Híbrido do tipo Plug In (PHEV).

O PHEV é semelhante ao HEV mas se diferencia-se pela sua conexão à rede elétrica e a dimensão de seus motores e bateria. A sua bateria é pouco maior do que a bateria do HEV e o ICE (*do inglês: Internal Combustion Engine*) é pouco menor do que o ICE do HEV ou de um veículo à combustão comum.

Tanto o HEV e quanto PHEV tem o mesmo objetivo: aumentar a autonomia do veículo, utilizando uma combinação de um motor elétrico com um ICE e uma bateria. A principal diferença entre os dois é a possibilidade do PHEV se conectar à rede elétrica.

Quando em funcionamento dentro de uma cidade, onde a velocidade de deslocamento é menor, o veículo tende a utilizar somente o motor elétrico. Em locais onde a velocidade pode ser maior, o ICE é ativado. A sua bateria pode ser recarregada tanto pela inércia do veículo, quando está em declives, quando este está frenando, desacelerando ou em locais específicos onde o veículo possa ser conectado à rede elétrica.

Entretanto, para a utilização desse veículo, é necessário um planejamento que garanta a satisfação do cliente, mas que ao mesmo tempo respeite as restrições da rede de distribuição de energia a qual ele está conectado.

O PHEV pode funcionar de duas maneiras em função do gerenciamento de energia no qual cada forma apresenta vantagens e desvantagens cujo objetivo principal é o aumento da autonomia do veículo e redução de gases poluentes emitidos pelo ICE (OSORIO, 2013).

A seguir, são mostradas as configurações das arquiteturas que ilustram a disposição dos componentes e o gerenciamento de energia.

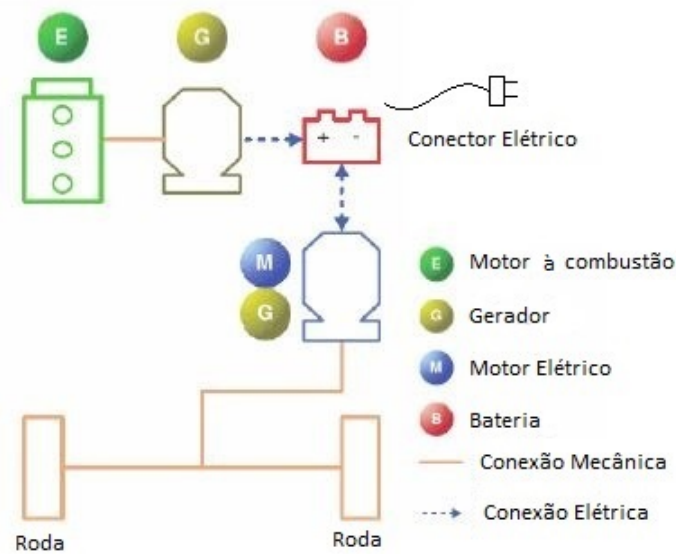
2.2.2.1 Arquitetura PHEV Série

Esta configuração, mostrada na Figura 2, tem o ICE conectado ao gerador elétrico. Também há uma conexão da bateria diretamente com a rede para realizar o carregamento fora do tempo de funcionamento do veículo. Como o veículo é tracionado diretamente pelo motor elétrico, ele necessita de uma alta descarga de potência (Charge-Depleting mode (Modo Exaustão de Carga) (CD)). Essa configuração é a mais apropriada para um PHEV por ter um controle simples e melhor capacidade para operar em velocidades mais altas (OSORIO, 2013).

2.2.2.2 Arquitetura PHEV Paralelo

Este tipo de arquitetura, mostrada na Figura 3, tem um ICE conectado às rodas, no qual parte da energia é destinada às rodas e outra parte ao motor elétrico (atuando como gerador) para auxiliar o carregamento da bateria.

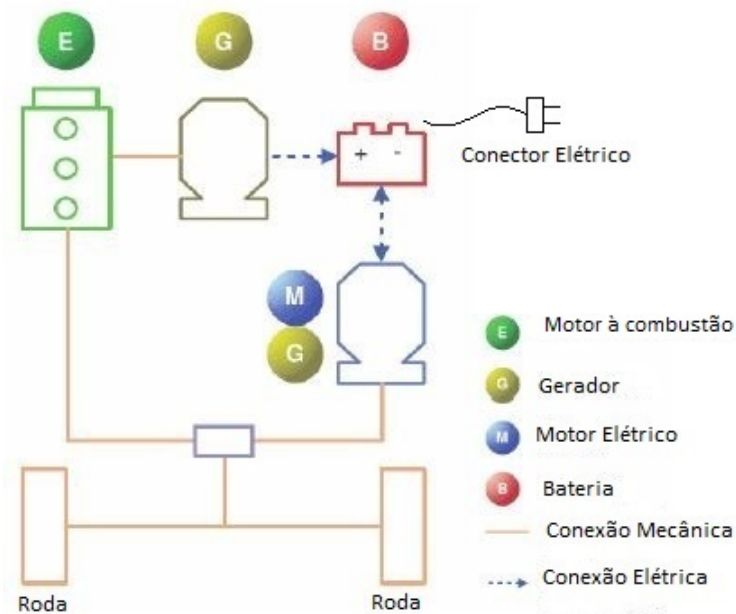
Figura 2 – Arquitetura PHEV Série.



Fonte: adaptado de Esposito (2008).

Há uma conexão mecânica do motor à combustão para um gerador, para realizar o carregamento da bateria ou para fornecer energia ao motor elétrico.

Figura 3 – Arquitetura PHEV Paralelo.



Fonte: adaptado de Esposito (2008).

A bateria tem uma conexão externa para o carregamento na rede elétrica. Esse tipo de configuração fornece maior flexibilidade em relação ao carregamento da bateria, podendo ser realizada tanto pela conexão com a rede elétrica quanto pelo próprio motor

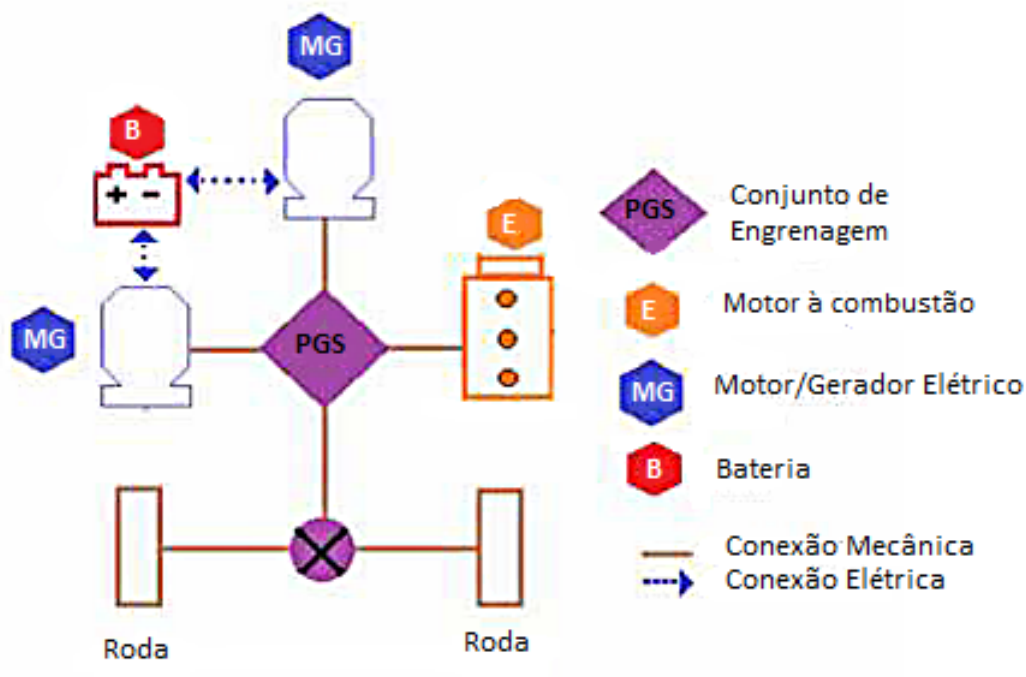
elétrico atuando como gerador durante os momentos de inércia como frenagem e desaceleração.

Essa configuração proporciona um modo de funcionamento conhecido como carga sustentável (Charge-Sustaining mode (Modo Sustentação de Carga) (CS)), pois o ICE também está conectado diretamente às rodas assim como o motor elétrico, não exigindo portanto, que somente o motor elétrico forneça tração às rodas (OSORIO, 2013).

2.2.2.3 Arquitetura PHEV com Potência dividida

Essa configuração, mostrada na Figura 4, reúne as características das arquiteturas PHEV série e PHEV paralelo, apresentando melhor desempenho tanto no modo CD quanto no modo CS e também pode mesclar esses dois tipos de modo de operação, que de acordo com Osorio (2013), é mais conhecido na literatura como *BLENDED*. É mais eficiente no uso do combustível e tem melhor dimensionamento das partes internas do PHEV. Os dois motores elétricos estão ligados à bateria. Dos dois motores elétricos saem conexões mecânicas que os ligam ao conjunto de engrenagem e este ao motor à combustão.

Figura 4 – Arquitetura PHEV com Potencia Dividida.



Fonte: adaptado de Osorio (2013).

2.2.2.4 Gerenciamento de Energia e Modos de Operação do PHEV

De acordo com as configurações do PHEV, ele pode fornecer um funcionamento dinâmico, alternando entre os diferentes modos de operação para garantir ótimo funciona-

mento do PHEV. Essa alternância dá-se pelo nível da bateria disponível ou pela eficiência do combustível.

Para qualquer arquitetura composta, o PHEV pode funcionar nos seguintes modos de operação de acordo com a necessidade naquele instante:

- Modo CS: modo para o controle do estado da bateria (State of Charge (Nível de Carga) (SOC)), em que a prioridade é utilizar o ICE para economizar carga da bateria e recarregá-la durante as frenagens e em momentos de desaceleração.
- Modo CD: é utilizada a bateria como meio de propulsão para auxiliar o ICE, dividindo sua carga para economizar combustível.
- Modo VE: o PHEV opera somente com o motor elétrico, utilizando a energia elétrica proveniente da bateria.
- Modo somente à combustão (Internal Combustion Engine Vehicles (Veículos com Motor à Combustão Interno) (ICEV)): o PHEV opera somente com o uso do ICE, poupando a bateria para o seu carregamento.

Analisando a Figura 5, pode-se observar o funcionamento do PHEV para qualquer arquitetura. O SOC está inicialmente em 90%, operando no modo CD, ou seja, o uso do motor elétrico é priorizado com o objetivo de economizar combustível do ICE, utilizado apenas em momentos nos quais maior potência é exigida do veículo. Esse modo de operação é conhecido como misto (*do inglês: BLENDED*), que mescla o uso do motor elétrico com o motor à combustão. Portanto, até a carga da bateria do VE atingir em torno de 30%, o veículo pode operar no modo totalmente elétrico ou misto. Nesse modo, o carregamento da bateria pode ser feito em momentos de desaceleração e frenagem, no qual o motor elétrico atua como um gerador para realizar o carregamento da bateria.

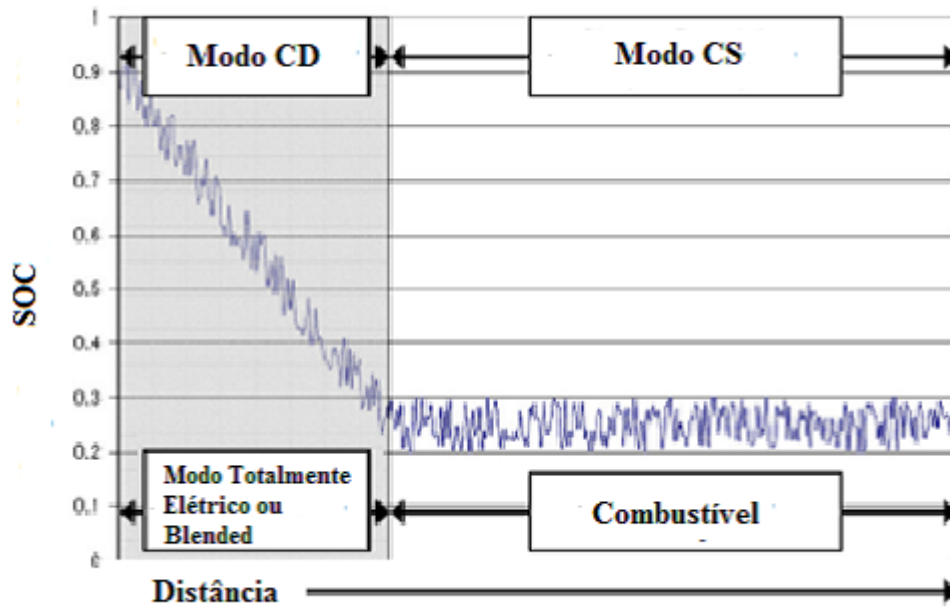
À medida que o SOC vai diminuindo até chegar ao nível entre 30% e 20%, o PHEV passa a operar no modo CS, ou seja, utiliza a maior parte do tempo o ICE para conservar o SOC. O motor elétrico também pode ser acionado caso o PHEV demande mais potência. O SOC é mantido e o carregamento ocorre durante os momentos de frenagem e desaceleração enquanto o ICE está operando simultaneamente, no qual parte da energia são destinadas às rodas do veículo e outra parte são destinadas ao gerador para realizar o carregamento da bateria e mantê-la em um nível específico.

2.2.3 Veículo Elétrico à Bateria (BHEV)

Este tipo de veículo depende totalmente de estar conectado a uma tomada na rede elétrica para recarregar sua bateria, tendo menor autonomia. A sua configuração interna, mostrada na Figura 6, é composta apenas de uma bateria e um motor elétrico. A sua bateria, entretanto, é maior devido à necessidade de armazenar mais energia, já que não há o auxílio do ICE para dividir a carga de locomoção.

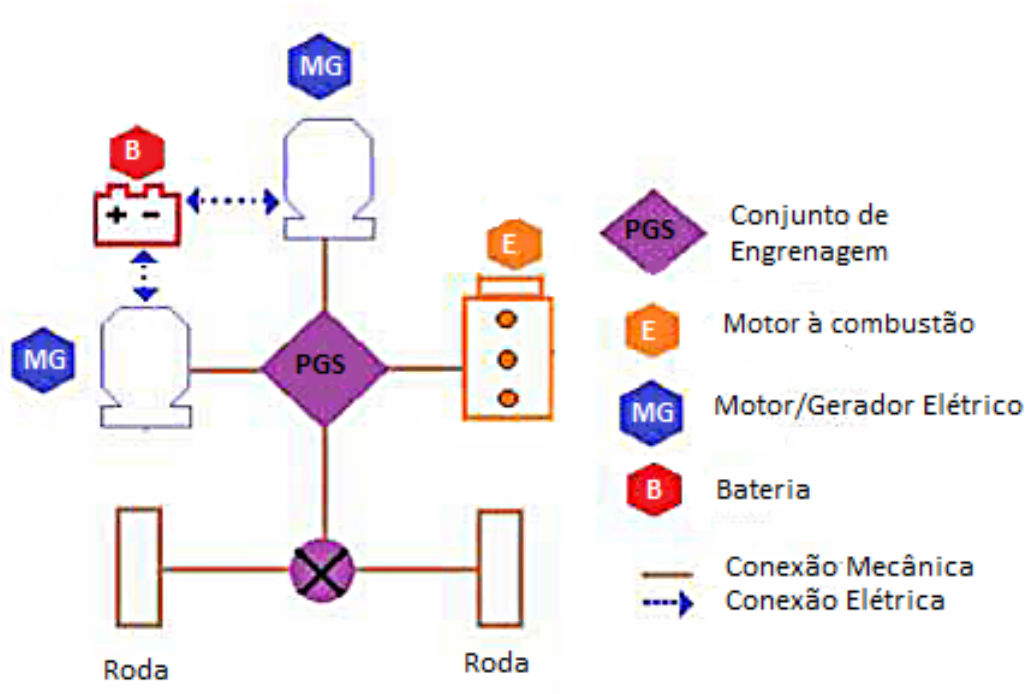
Também há a possibilidade de fazer a recarga da bateria durante os momentos de desaceleração e frenagem, onde um sistema controlado faz o motor elétrico atuar como

Figura 5 – Modo de Operação do PHEV.



Fonte: Osorio (2013).

Figura 6 – Veículo Elétrico à Bateria.



Fonte: adaptado de Osorio (2013).

gerador. Para auxiliar o sistema de carregamento, podem ser usados ultra capacitores, para armazenar uma carga rápida e transferí-la para a bateria que pode não conseguir

armazenar energia em curtos períodos de tempo.

2.3 Baterias

Com o aumento da circulação de VEs nos próximos anos, naturalmente o mercado de baterias vai crescer da mesma forma, já que elas estão presentes em todos os VEs. Com isso, aumenta a busca por melhoria na tecnologia das baterias, já que a autonomia é a sua maior limitação. Com o êxito na comercialização de VEs, os resultados podem ser muito positivos em relação ao meio ambiente, diminuindo o impacto causado pela emissão de poluentes pelos veículos.

2.3.1 Tipos de Baterias

Nesta seção, serão mostradas as baterias de Chumbo-Ácido, Níquel-Hidreto Metálico e Íons de Lítio.

2.3.1.1 Chumbo-Ácido (Pb)

É a bateria mais antiga usada nos VEs. É muito tóxica para o meio ambiente, se não for descartada da maneira correta, por apresentar metal pesado em sua composição e um ácido corrosivo. É uma bateria popular e de baixo custo. Em geral, tem um bom desempenho, fácil indicação do estado de carga e uma boa retenção de carga em caso de carregamento intermitente. Entretanto, a química das células tem baixa densidade de energia fazendo que elas sejam muito pesadas para mesma quantidade de energia em comparação com outros tipos de baterias, tornando-as menos adequadas para o uso nos VEs (SYSTEMS, 2017).

2.3.1.2 Níquel-Hidreto Metálico

Essa bateria é usada atualmente em veículos como o *Toyota Prius* devido à sua alta potência, o que é fundamental para movimentar veículos totalmente elétricos. É encontrada comercialmente com uma densidade de energia de 2000 Wh/l (Wh por litro) e com uma energia específica de 75 Wh/Kg. É uma tecnologia que atenderia à necessidade dos vários VEs, pois apesar das especificações antes citadas, ela tem uma vida útil de até 3000 ciclos.

2.3.1.3 Íons de Lítio

A bateria de íons de lítio é atraente devido ao seu baixo peso e alta capacidade de energia específica (Wh/Kg) e tem sido usado em baterias recarregáveis para fornecer três vezes mais a densidade de energia (Wh/l) em comparação com as baterias citadas

anteriormente. A tendência natural é que este tipo de bateria domine o mercado dos VEs. Foi inicialmente desenvolvida para aplicações menores tais como baterias de notebooks e celulares. Também possui uma vida útil maior, assim como a capacidade de ciclos de carregamento e também pode ser carregada mais rapidamente do que as baterias convencionais. Não possui o efeito memória, na qual as baterias, se não forem carregadas completamente, começam a apresentar problemas como não assegurar o nível de carga adequadamente. Devido a todas essas características, as baterias de íons de lítio são as que possuem melhor tecnologia para ser aplicada em VEs (SYSTEMS, 2017).

2.3.2 Especificações de Alguns Tipos de Baterias

Atualmente, o PHEV é o tipo de veículo que tem maior tendência em dominar o mercado pela sua não dependência da bateria e maior economia de combustível. Por isso, é necessário adequar cada VE a uma bateria que atenda suas necessidades de acordo com a especificação e finalidade do VE.

As baterias, citadas anteriormente, se distinguem principalmente nas seguintes características:

- **Densidade de Energia:** É a quantidade de energia que uma bateria pode armazenar em um determinado volume (Wh/l). Este fator determina o tamanho necessário da bateria para armazenar uma certa quantidade de carga.
- **Energia Específica:** É a quantidade de energia que uma bateria pode armazenar por unidade de massa (Wh/kg). Este fator determina o peso necessário da bateria para armazenar uma certa quantidade de carga.
- **Ciclos:** Um ciclo de carga acontece quando é utilizada capacidade total da bateria. Esse é um fator que determina a vida útil das baterias que não possuem efeito memória.

Na Tabela 2, são mostradas algumas especificações das baterias mencionadas anteriormente. Pode-se comparar mais facilmente em termos de números, a superioridade da bateria de íons de lítio. Os dados foram coletados de acordo com Systems (2017).

Outro fator importante a se considerar é o nível de segurança de cada uma das baterias, pois elas contêm reagentes químicos que podem ser perigosos se for feito um mal uso da bateria. Os fabricantes de VEs devem garantir que o sistema de carregamento das baterias de seus veículos sejam capazes de realizar o carregamento de forma adequada para cada tipo de bateria monitorando temperatura, nível de carga e tensão.

Tabela 2 – Especificações das Baterias.

Tipo de Bateria	Energia Específica (Wh/Kg)	Densidade de Energia (Wh/l)	Potência Específica (W/kg)	Ciclos de Vida	Efeito Memória (nº de ciclos)
Chumbo-Ácido	30-40	50-90	100-200	200-400	Não
Níquel-Hidreto Metálico	55-110	160-420	100-500	500-1000	Sim
Íons de Lítio	100-300	125-600	500-5000	>2000	Não

Fonte: Systems (2017).

2.3.3 Vida útil das baterias

A vida útil de uma bateria é definida de acordo com os ciclos de recarga aos quais ela está submetida. Variações bruscas em corrente e tensão causam um aumento de temperatura que pode prejudicar seriamente sua vida útil (SYSTEMS, 2017).

2.4 Carregamento de Veículos Elétricos

Os VEs podem ser conectados à rede por meio de tomadas já padronizadas ao sistema de distribuição de energia elétrica. Essa carga adicional dos VEs no sistema de distribuição precisa ser controlada, pois causa perdas de energia e quedas de tensão.

O objetivo das concessionárias de energia elétrica é coordenar os níveis de carregamento do sistema elétrico em função dos horários do dia, a partir de um planejamento de utilização mais eficiente, por exemplo, as *Smart Grids*. Uma nova infraestrutura de medição avançada (Advanced Metering Infrastructure (Infra-Estrutura de Medição Avançada) (AMI)) é o elemento mais importante das *Smart Grids*, pois permite realizar o controle da demanda de carga remotamente (OSORIO, 2013).

Na próxima seção é apresentada uma visão geral sobre as características de carregamento dos VEs depois de serem conectados na tomada, assim como a infraestrutura necessária para possibilitar o carregamento dos veículos após a conexão à rede.

2.4.1 Métodos de carregamento dos VEs

Atualmente, existem dois métodos de conexão para realizar o carregamento dos VEs: por conexão condutiva e indutiva. Esta última consiste em uma tecnologia sem fio que utiliza campo magnético para o acoplamento sem um contato direto. Não se sabe se futuramente ela será usada em grande escala, pois apresenta algumas limitações como as perdas de 10% (OSORIO, 2013).

Portanto, o tipo de conexão usual é por conexão condutiva, onde a conexão do VE ao carregador é feita por um fio em um esquema já desenvolvido e normalizado pela EPRI (Electric Power Research Institute) que consiste de uma estrutura física para realizar o carregamento dos VEs de forma adequada às necessidades do proprietário do VE (OSORIO, 2013). Existem três tipos de carregamento de VEs relacionados ao tempo de carregamento necessário para a bateria atingir o nível de carga ideal: nível 1, 2 e 3. A seguir, esse níveis de carga são apresentados.

2.4.1.1 Nível 1 de carga

Esse modo de carregamento das baterias dos VEs também é conhecido como modo lento, onde o VE tem uma disponibilidade de tempo maior para ser efetuada a recarga. Este tipo de carregamento é normalmente efetuado em residências onde os veículos ficam conectados às tomadas de baixa tensão na garagem em períodos noturnos. Também pode ser feito nos estacionamentos de empresas, onde os carros ficam estacionados durante todo o período de trabalho.

Neste modo de carregamento, é utilizada uma tensão padrão de 127 VCA (Volt Corrente Alternada) com corrente de 15 A (Ampere) ou 20 A. Esse nível de tensão é comumente encontrado em garagens residenciais e estacionamento de empresas, por isso torna esse tipo de carregamento adequado para esses locais.

Este método de carregamento fornece uma taxa de potência máxima de 3,44kW, levando um tempo maior para carregar baterias com maior capacidade de energia.

Para este tipo de carregamento, é utilizado um tipo de conector padrão (o SAE J1772) mostrado nas Figuras 7 e 8.

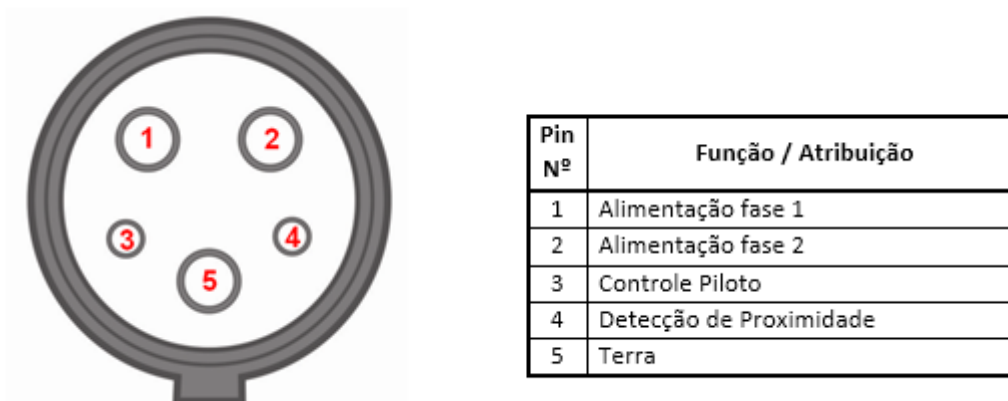
Figura 7 – Conector SAE J1772.



Fonte: CPFL (2018)

Com relação à Figura 8, os pinos 1 e 2 são as conexões da fase e neutro. O pino 3 denomina-se Controle Piloto e é uma linha de comunicação usada para controlar a taxa de carregamento máxima de acordo com as restrições do veículo e da bateria. O pino 4

Figura 8 – Pinos do Conector SAE J1772.



Fonte: CPFL (2018)

(Detecção de Proximidade) impede o movimento do carro enquanto estiver carregando. O pino 5 é conexão para o aterramento elétrico.

2.4.1.2 Nível 2 de carga

O nível de carga intermediário é o modo de carregamento mais apropriado segundo Osorio (2013). A conexão do veículo elétrico é feita com a rede de alimentação CA utilizando uma tomada comum no lado da alimentação. A conexão não pode exceder 32 A para ligação monofásica ou trifásica, e requer condutores de energia e proteção. O dispositivo incorporado no cabo, mostrado na Figura 9, tem as funções de piloto e de controle (GE, 2012). São normalmente utilizados em parques de estacionamento.

2.4.1.3 Nível 3 de carga

Esse modo também é conhecido como carga rápida. A maior limitação dos veículos totalmente elétricos é a autonomia da bateria e o tempo de carregamento, que nos modos 1 e 2, podem ser inadequados para a necessidade diária do veículo. Portanto, esse modo de carregamento soluciona o problema relacionado ao tempo de carregamento. Como esse modo pode fornecer uma taxa de carregamento de até 20 kW, causando um aquecimento da bateria e diminuindo sua vida útil, é necessário que o VE seja compatível com essa taxa de carregamento, possuindo maior nível de segurança relacionado às baterias. Desse modo, o VE pode ser carregado até atingir um SOC de 80% em menos de uma hora (OSORIO, 2013).

Esse tipo de carregamento não será possível em lugares comuns como residências e estacionamento devido à demanda de potência muito alta, é necessário uma infraestrutura preparada para suportar tal custo.

Figura 9 – DuraStation™: o Carregador de Veículos Elétricos da GE



Fonte: GE (2012).

Portanto o que se prevê é a criação de estações carregadoras semelhantes aos postos de combustíveis, com uma infraestrutura preparada, onde os veículos poderão ser carregados em um intervalo de tempo menor. Dependendo da aplicação, pode-se conseguir um nível de carga das baterias de até 50% em 15 minutos com o fornecimento da taxa de carregamento variando de 60 a 150 kW. Na Figura 10, pode-se ver esse tipo de estrutura instalada na estação de carregamento (OSORIO, 2013).

2.4.1.4 Troca da Bateria

Outra solução que deve ser levada em conta são as trocas das baterias, que poderiam ser feitas nas estações de carregamento. Nesse caso, um usuário iria com seu veículo à estação, deixaria sua bateria para ser carregada e sairia de lá com outra bateria carregada. Isso também resolveria o problema com o tempo de carregamento. Porém, não é algo tão simples de ser feito, devido ao peso das baterias, que pode chegar facilmente a 200 kg. Seria necessário então um processo automatizado, que teria um custo elevado, para fazer a remoção e a reposição da bateria no compartimento do VE. Esse processo de remoção e inserção da bateria também pode causar danos à bateria reduzindo sua vida útil. Por esse motivo seria necessário investir em tecnologia, de modo que os compartimentos das baterias fossem versáteis e pudessem ser removidas de forma prática e eficaz, assim como o reforço dos contatos das baterias e dos veículos, de modo que não haja muito desgaste com esse processo de inserção e remoção (OSORIO, 2013).

Figura 10 – Equipamento de Carga Rápida.



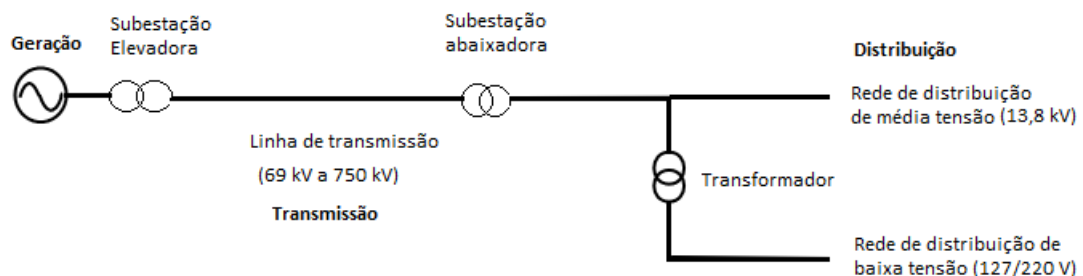
Fonte: Osorio (2013).

3 Rede de Distribuição de Baixa Tensão

O funcionamento das redes de distribuição de energia elétrica depende de algumas etapas que antecedem a ela como a geração e a transmissão. Primeiramente, é gerada a energia em uma usina hidrelétrica, eólica, termelétrica dentre outras. Em seguida, a tensão é elevada em uma estação transformadora para a energia ser transmitida a longas distâncias. A transmissão ocorre a uma tensão que pode variar de 69 kV até 750 kV (CA), dependendo da aplicação (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2005). Quando essas linhas chegam ao destino, elas passam por uma subestação transformadora abaixando o nível de tensão, surgindo assim a rede de distribuição primária, ou de média tensão.

A rede primária percorre áreas urbanas ou rurais com postes para entregar energia às residências ou indústrias, que através de transformadores, convertem esse nível de tensão médio (p. ex. 13,8kV) para um nível de tensão baixo (p. ex. 127/220 V). Esse baixo nível de tensão caracteriza as redes de distribuição secundárias. A Figura 11 ilustra o que foi explicado anteriormente.

Figura 11 – Diagrama Unifilar do sistema elétrico.

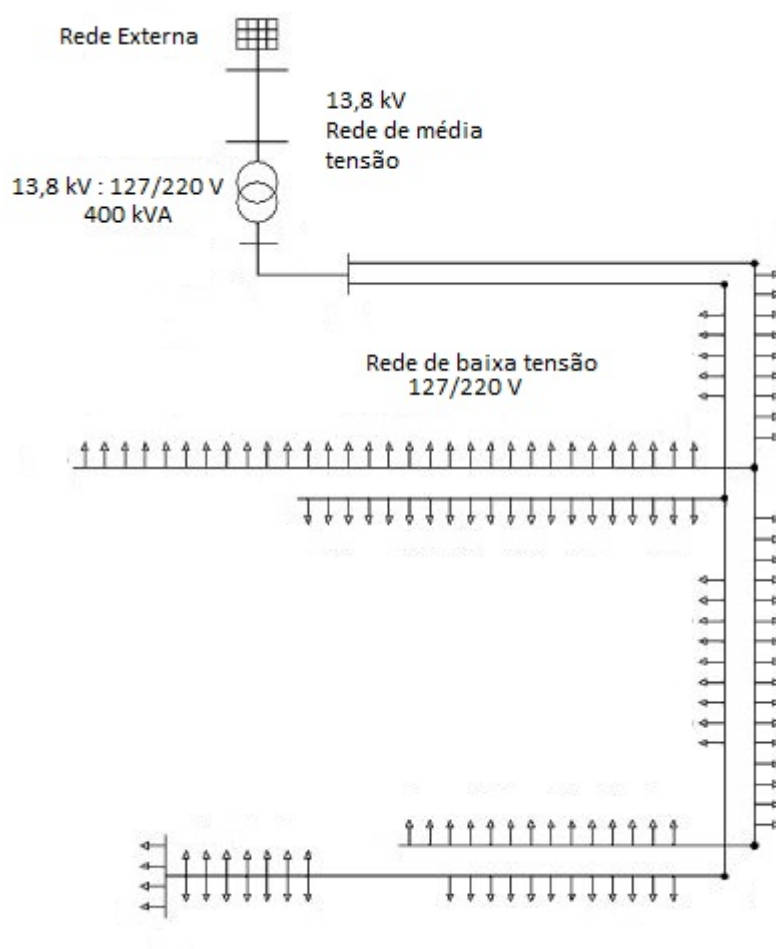


Fonte: Do autor.

3.1 Redes de Baixa Tensão

Dos transformadores conectados na rede primária, derivam-se as linhas de distribuição secundárias que tem tamanhos de algumas centenas de metros, modelo mais conhecido como linha curta, que pode atingir no máximo 80 km. É característica dessas linhas estarem ligadas a cargas residenciais, pequenos comércios e indústrias, mas a maior parte das cargas são residenciais (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2005). Na Figura 12, é mostrado um exemplo de rede de distribuição de baixa tensão. Os limites de tensão para as redes de baixa tensão atingem $\pm 10\%$ do valor nominal, de acordo com o módulo 8 do PRODIST.

Figura 12 – Diagrama Unifilar de uma rede de baixa tensão.



Fonte: (RICHARDSON; FLYNN; KEANE, 2012).

3.1.1 Modelo Linha Curta

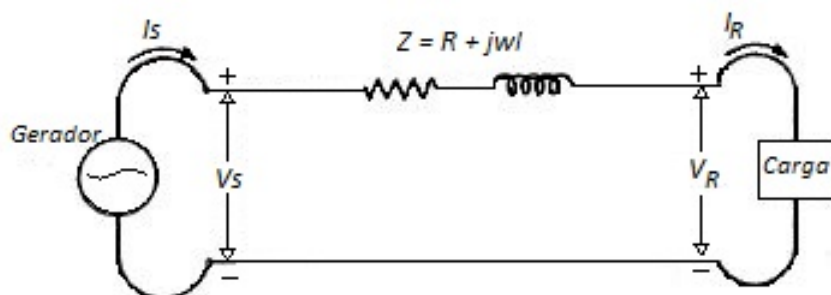
As linhas curtas são representadas por aquelas que tem uma extensão de até 80 km. Desse modo, as linhas curtas são representadas apenas por parâmetros em série de resistência e indutância (reatância indutiva).

O circuito equivalente de uma linha de transmissão curta monofásica, que é o caso tratado neste trabalho, é mostrado na Figura 13, onde I_S e I_R são as correntes na barra transmissora e receptora, respectivamente, e V_S e V_R são as tensões linha-neutro nas barras transmissora e receptora, respectivamente. A resistência R e a indutância L são os valores totais da linha (JR, 1986).

O circuito é resolvido como um circuito CA série simples. Como não existe nós de a corrente é a mesma no início e no fim da linha. Portanto

$$I_S = I_R \quad (3.1)$$

Figura 13 – Circuito equivalente de uma linha de transmissão curta com um gerador e uma carga.



Fonte: (JR, 1986).

A tensão na barra de geração é

$$V_S = V_R + I_R Z \quad (3.2)$$

Em que Z é a impedância total da linha.

3.1.2 Modelagem da Carga

As cargas de um sistema elétrico podem ser classificadas em função de algumas características, tais como sua localização geográfica (urbana ou rural), o uso final de energia (comercial, residencial, industrial ou misto), o nível de tensão de suprimento, por exemplo: 127V, 220V, 480V, 13,8kV. A potência absorvida por uma carga pode variar conforme a natureza da carga. A característica mais importante a ser levada em conta nesse trabalho é o fator de potência que será abordado na próxima seção. A demanda de uma instalação é a carga nos terminais receptores tomada em valor médio para um determinado intervalo de tempo. Na Figura 14, é mostrado um exemplo de curva de demanda diária de carga, que indica como uma carga residencial pode variar durante um período de 24 horas.

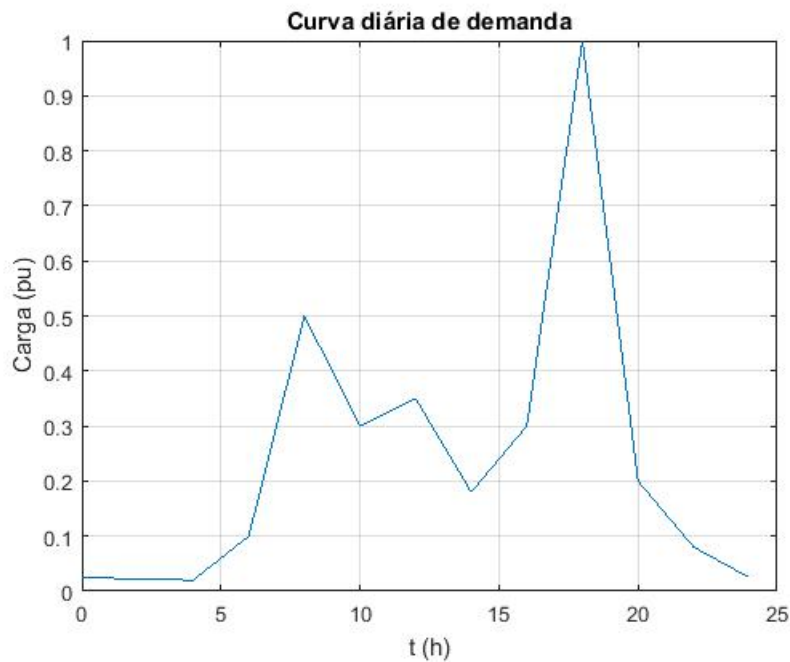
Para o cálculo do fluxo de potência neste trabalho, é considerado o modelo de potência constante.

3.1.3 Fator de Potência

O fator de potência (fp) é calculado a partir dos valores registrados de potência ativa e potência reativa da seguinte maneira:

$$fp = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (3.3)$$

Figura 14 – Curva diária de demanda residencial.



Fonte: Adaptado de Jr (1986).

Em que, P é a potência ativa e Q é a potência reativa. O fator de potência pode variar dependendo das características da carga, sendo elas do tipo: residencial, comercial e industrial. A carga levada em consideração neste trabalho é a residencial.

3.1.4 Transformador

O transformador utilizado para abaixar o nível de média tensão para o nível de baixa tensão tem algumas características como:

- Refrigeração: ONAN - Óleo Natural, Ar Natural - Imerso em óleo isolante mineral.
- Tensão Primária: 13.8 kV; Tensão Secundária: 220/127 V.
- Enrolamento primário em triângulo (delta); Enrolamento secundário com neutro acessível (estrela).
- Potência Nominal: É a capacidade máxima de potência, em regime permanente, que um transformador pode fornecer para um sistema. Este é um dos principais fatores que motivam a aplicação da otimização proposta neste trabalho, que visa diminuir a carga do transformador.

4 Modelagem Matemática do Carregamento de VEs

Neste capítulo, serão apresentados dois modelos matemáticos que são utilizados para a solução do problema de carregamento dos VEs.

O primeiro modelo é linear e é resolvido através da função *linprog* do Matlab que utiliza o método Simplex. Este modelo é baseado no método proposto por Richardson, Flynn e Keane (2012), que visa maximizar o carregamento dos VEs sem ultrapassar os limites operacionais do sistema. As restrições da rede e do transformador, obtidas pela execução do fluxo de potência no OpenDSS, são modeladas em forma matricial e são utilizadas na função *linprog* do Matlab.

O segundo modelo trata-se de uma otimização não linear, que é resolvida utilizando algoritmo genético baseado no método proposto por Mehta et al. (2018), que visa minimizar a relação entre a demanda de pico e a demanda média do sistema. Neste método são modeladas as restrições de carregamento dos VEs e, a partir disto são criadas as estratégias de carregamento para serem utilizadas no algoritmo genético, que escolhe o melhor resultado. A partir da curva de carga encontrada como o melhor caso, a mesma é utilizada no sistema testado para a execução do fluxo de potência para obtenção e comparação dos resultados.

4.1 Modelo de Otimização 1

Para a implementação deste modelo, é importante entender algumas suposições consideradas, retiradas do texto de Richardson, Flynn e Keane (2012):

- Assume-se aqui que os proprietários de VEs carregam seus veículos em qualquer hora do dia, inclusive em horários de pico, atribuindo um comportamento aleatório ao carregamento. O tipo de tecnologia adotada se trata da G2V (*do inglês: Grid to Vehicle*), no qual os VEs somente absorvem energia do sistema.
- Tecnologia de medição inteligente com controle de carga também é presumida como presente em cada domicílio.
- É suposto que nos domicílios exista apenas um VE, que carrega a uma taxa pré-definida de 4 kW até atingir 95% da capacidade da bateria, e posteriormente carrega a uma taxa de 1,5 kW até atingir os 100%.
- Também assume-se que cada VE é conectado à rede por meio de uma conexão CA padrão.

- É considerado que cada VE tem uma bateria com capacidade de 20 kWh e são modeladas como cargas constantes com fator de potência unitário.

As equações a seguir, são utilizadas para a otimização através da programação linear. O objetivo desse método é maximizar a energia entregue aos VEs em um determinado intervalo de tempo.

$$\max \{F\} = \sum_{i=1}^N P_{EV_i}^t x_i \quad (4.1)$$

$$s.a. \quad 0 \leq P_{EV_i}^t \leq P_{EV_i}^{max} \quad (4.2)$$

$$P_{EV_i}^{t-1} - \Delta \leq P_{EV_i}^t \leq P_{EV_i}^{t-1} + \Delta \quad (4.3)$$

$$V_{min_i} \leq V_i^t \leq V_{max_i} \quad i \quad \forall \quad N \quad (4.4)$$

$$L_T^t \leq L_{Tmax} \quad (4.5)$$

$$\mu_i^t = \frac{V_{i,comVE}^t - V_{i,semVE}^t}{P_{EV_i}^t} \quad (4.6)$$

$$\mu_{ji}^t = \frac{V_{j,comVE}^t - V_{i,semVE}^t}{P_{EV_j}^t} \quad (4.7)$$

$$V_{min_i} \leq V_{inic_i}^t + \mu_i^t P_{EV_i}^t + \sum_{j=1}^N \mu_{ji}^t P_{EV_j}^t \leq V_{max_i} \quad i \quad \forall \quad N, \quad i \neq j \quad (4.8)$$

$$\delta_k^t = \frac{S_{T,comVE}^t - S_{T,semVE}^t}{P_{EV_k}^t} \quad (4.9)$$

$$L_{Tinic}^t + \sum_{k=1}^N \delta_k^t P_{VE_k}^t \leq L_{Tmax} \quad k \quad \forall \quad N \quad (4.10)$$

A função objetivo (F) é dada pela Equação 4.1, em que N é o número de barras da rede e $P_{EV_i}^t$, medida em kW, é a potência entregue para cada veículo conectado ao i -ésimo ponto de conexão com a rede no instante de tempo t analisado. Assume-se que $P_{EV_i}^t$ é uma variável de controle contínuo que pode variar de zero até a potência máxima suportada pelo veículo. O parâmetro x_i é zero quando o veículo não está conectado na rede ou quando sua carga já está completa. É igual a 1 quando se deseja minimizar ou igual a -1 quando se deseja maximizar o carregamento do veículo que está carregando no i -ésimo ponto de conexão. Neste trabalho, o objetivo é maximizar o carregamento.

A função objetivo padrão é maximizada e sujeita às restrições. A primeira delas, dada pela Equação 4.2, limita o carregador a uma taxa de carregamento máxima que não exceda a capacidade nominal do carregador para não prejudicar a vida útil da bateria. $P_{EV_i}^{max}$ é o limite de potência máxima que pode ser entregue ao veículo conectado na barra i . Também é importante evitar uma variação muito grande na taxa de carregamento da bateria, para evitar danos e reduzir sua vida útil. Por isso, é utilizada a restrição da Equação 4.3, que limita essa variação em um dado instante de tempo para o próximo instante. Nesta equação, t é o instante de tempo atual e Δ é um limite de variação da taxa de carregamento dado em W.

A próxima restrição, Equação 4.4, trata das quedas de tensão nos barramentos. O acréscimo de cargas ao longo da linha causam quedas de tensões. Portanto, é necessário definir uma faixa de tensão aceitável. Nesta equação, V_i^t é a tensão no i -ésimo ponto de conexão de carregamento no instante de tempo t analisado, enquanto V_{max_i} e V_{min_i} são os valores de tensão máxima e mínima permitidas na barra i , respectivamente.

Neste trabalho, é considerado uma rede de baixa tensão na qual é alimentada por um transformador. Portanto, é de muita importância levar em conta a capacidade desse transformador, dada pela Equação 4.5, para evitar a sobrecarga que conseqüentemente diminui sua vida útil. Nesta equação L_T^t é o carregamento do transformador no instante de tempo t analisado e $L_{T,max}$ é a capacidade máxima do mesmo.

O fluxo de potência é necessário para obter os valores de tensões e potências do sistema elétrico. Ele é executado sem VEs conectados e, posteriormente é executado novamente para obter as variações de tensão e potência no sistema, para serem feitos os cálculos dos índices de sensibilidades μ_i^t , μ_{ji}^t e δ_k^t .

O índice μ_i^t representa a sensibilidade de tensão no i -ésimo ponto de conexão devido a potência exigida pelo VE no mesmo ponto de conexão. Essa sensibilidade é calculada a partir da Equação 4.6, em que $V_{i,comVE}^t$ é a tensão na barra i com VE conectado e $V_{i,semVE}^t$ é a tensão na barra i sem VE conectado. O super índice t representa o instante de tempo analisado.

O parâmetro μ_{ji}^t é a sensibilidade de tensão no i -ésimo ponto de conexão, devido à potência exigida por um VE conectado no j -ésimo ponto de conexão e no instante de tempo t . O cálculo desta sensibilidade é feito a partir da Equação 4.7.

A restrição de tensão com os índices de sensibilidade é dada pela Equação 4.8, em que $V_{inic_i}^t$ é a tensão inicial no i -ésimo ponto de conexão da rede sem o carregamento de VEs no instante de tempo t .

O índice δ_k^t representa a sensibilidade de carregamento térmico do transformador devido à demanda de energia de um VE conectado no k -ésimo ponto de conexão. O cálculo dessa sensibilidade é feito a partir da Equação 4.9, em que $S_{T,comVE}^t$ é a potência aparente fornecida pelo transformador (kVA) com VE conectado. $S_{T,semVE}^t$ é a potência fornecida pelo transformador (kVA) sem VE conectado. O super índice t representa o instante de

tempo analisado.

As restrições de carregamento térmico são resumidas pela Equação 4.10, em que $L_{T_{inic}}^t$ é o nível de carregamento térmico inicial do transformador no instante de tempo t .

4.2 Modelo de Otimização 2

Para a implementação deste modelo, é importante entender algumas suposições consideradas, retiradas do texto de Mehta et al. (2018):

- Inicialmente os veículos saem de casa com a bateria completa, supondo que haja um ponto de carregamento na casa.
- Ao chegar ao estacionamento após a primeira viagem, as informações necessárias são passadas para o coordenador de carregamento que através do Algoritmo Genético escolhe a melhor estratégia de carregamento possível.
- Neste modelo são aplicados as tecnologias G2V (*do inglês: Grid to Vehicle*), no qual o veículo absorve energia da rede elétrica e V2G (*do inglês: Vehicle to Grid*), no qual o veículo fornece energia ao sistema elétrico.

4.2.1 Comportamento Diário

A quilometragem média de um veículo pode variar diariamente, dependendo da sua trajetória. Neste trabalho foram consideradas 3 viagens: a primeira de casa até o suposto local de trabalho, a segunda depois do estacionamento para um destino intermediário, e a última deste destino para casa.

O modelo físico deste comportamento diário é mostrado na Figura 15, no qual pode-se ver como se aplica as equações e as definições a seguir, propostas por Mehta et al. (2018).

$$SOC_A = 1 - \frac{d}{d_r} \quad (4.11)$$

$$SOC_D = \frac{STD}{d_r} + 0.2 \quad (4.12)$$

$$SOC_{req} = \begin{cases} 1 - SOC_A, & SOC_D > 1 \\ (SOC_D - SOC_A), & SOC_A < SOC_D < 1 \\ 0, & SOC_D = SOC_A \\ -(SOC_A - SOC_D), & 0.2 < SOC_D < SOC_A \end{cases} \quad (4.13)$$

$$E_{req} = SOC_{req} \cdot B_c \quad (4.14)$$

O SOC (*do inglês: State of Charge*) é definido como o montante de energia elétrica disponível na bateria do PEV. Na Equação 4.11 é mostrado o cálculo SOC inicial da bateria (SOC_A). Ele é definido quando o PEV chega ao estacionamento após percorrer sua primeira viagem. Esse valor pode ser mostrado no painel do VE assim como um veículo tradicional indica o nível de combustível. A variável d_r representa a autonomia do veículo com um determinado SOC qualquer e d representa a primeira viagem percorrida pelo veículo até o estacionamento.

Na Equação 4.12 é mostrado como se calcula o SOC final da bateria (SOC_D). A variável STD (*do inglês: Subsequent Trip Distance*) representa a distância a ser percorrida na próxima viagem, que neste caso é a soma das distâncias das duas viagens subsequentes após o VE sair do estacionamento.

Na Equação 4.13 é mostrado como se calcula o SOC_{req} , no qual o subíndice *req* significa requerido, ou seja, o nível de carga requerido pelo VE, baseados nas informações do SOC_A e SOC_D . Baseado nas informações do SOC_{req} e o SOC da bateria (B_c) é feito o cálculo da energia requerida (E_{req}) que a bateria precisa armazenar, como mostrado na Equação 4.14.

Como exemplo para serem utilizados neste trabalho, as distâncias escolhidas foram baseadas no texto de Mehta et al. (2018), cuja quilometragem média diária de um veículo foi de 55 km, com um desvio padrão de 10 km. O número de viagens foram de 3 por dia, em que cada uma tem uma distância média de 17,3 km.

4.2.2 Aplicação do Modelo

A seguir são mostradas as equações necessárias para a aplicação do Algoritmo Genético. Este método tem como objetivo minimizar o pico e achatar uma determinada curva de carga.

$$\min \{PAR\} = \frac{(\max_{t \in T} S_{total}^t)}{(\sum_{t=1}^T S_{total}^t)/T} \quad (4.15)$$

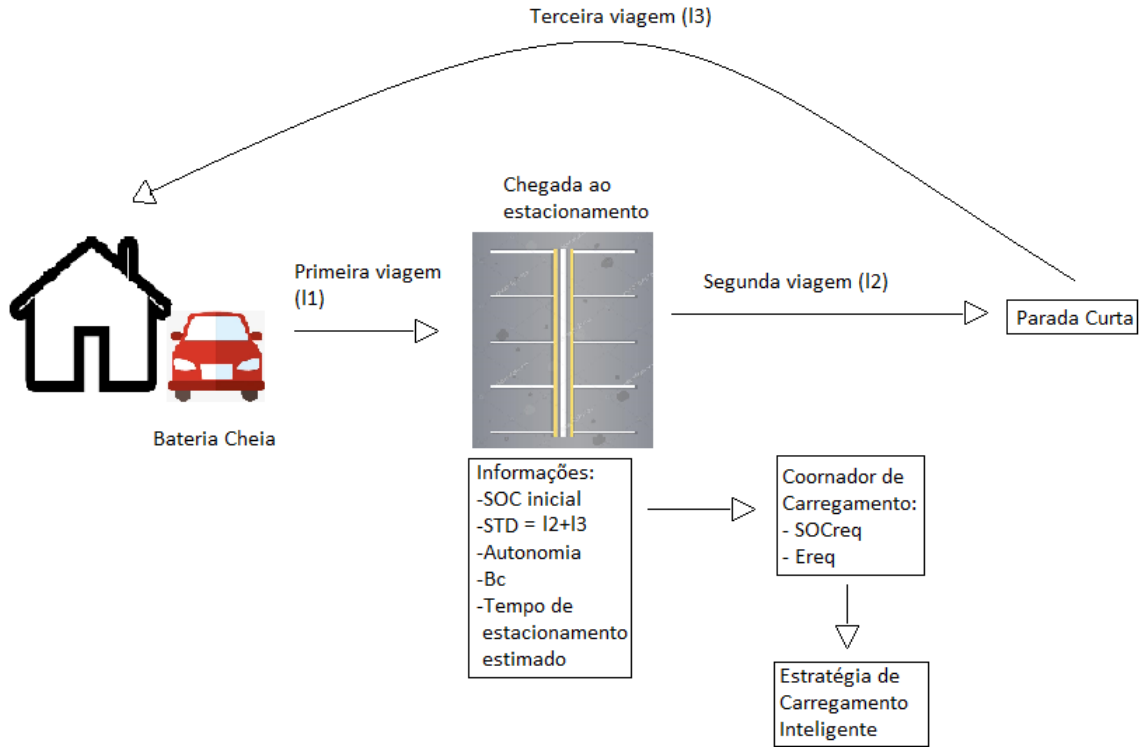
$$s.a. \quad \sum_{t=t_{in,k}}^{t_{out,k}} s_k^t \cdot r_{PEV,k} = E_{req,k}, \quad \forall k \in Z \quad (4.16)$$

$$0 \leq r_{PEV,k} \leq P_{rated}, \quad \forall k \in Z \quad (4.17)$$

$$SOC_{min} \leq SOC_k^t \leq SOC_{max}, \quad \forall t \in H; \quad \forall k \in Z \quad (4.18)$$

Com base no trabalho de Mehta et al. (2018), foi utilizada uma função objetivo calculada de acordo com a Equação 4.15, no qual o S_{total}^t representa a curva de carga somada à demanda dos veículos no estacionamento, t é o instante de tempo analisado e T é o número de intervalos de tempo. O objetivo desse método consiste em obter o menor

Figura 15 – Modelo Físico.



Fonte: Do Autor.

valor de PAR (*do inglês: Peak-to-Average Ratio*) que é a relação entre a demanda pico e a demanda média do sistema.

Para gerar o vetor de estratégias de carregamento (s_k^t), em que k representa um k -ésimo veículo no estacionamento e t o instante de tempo, é preciso respeitar algumas restrições para preservar a vida útil da bateria como: a capacidade de armazenamento, potência máxima que a bateria pode absorver e o nível de carga, representadas pelas equações 4.16, 4.17 e 4.18 respectivamente. Nestas últimas três Equações, r_{PEV} é a potência absorvida pela bateria durante o carregamento, E_{req} é a energia requerida pela bateria e P_{rated} é a taxa de carregamento máximo da bateria em W, e H representa os intervalos de tempo.

A estratégia de carregamento representa o comportamento de um determinado PEV ao longo do tempo, sendo que ele pode absorver energia, ficar ocioso e fornecer energia ao sistema elétrico. Dependendo da diferença dos valores de SOC_A e SOC_D , o vetor de estratégia s_k^t pode ser composto pelos seguintes valores devido às condições abaixo:

- $s_k^t = 1$ indica que o PEV está na operação de carregamento no intervalo de tempo t . Isso ocorre quando $SOC_D > SOC_A$;

- $s_k^t = 0$ indica que o PEV está inativo no intervalo de tempo t . Isso ocorre quando $SOC_D = SOC_A$;
- $s_k^t = -1$ indica que o PEV está na operação descarregamento no intervalo de tempo t . Isso ocorre quando $SOC_A > SOC_D$;

Dentre os resultados finais obtidos dessa otimização, um deles é a curva de carga, que é posteriormente usada como uma nova curva de carga da localidade onde os VEs estão conectados. Com essa nova curva, é possível executar novamente o fluxo de potência do sistema, e comparar os resultados do fluxo de potência de antes e depois da otimização.

5 Metodologia

Para otimizar o carregamento dos VEs, este trabalho utiliza duas metodologias. O primeiro se trata do modelo de otimização 1, mostrada na seção 4.1 no qual é aplicada a metodologia de Programação Linear. A segunda se trata do modelo de otimização 2, mostrada na seção 4.2, no qual é aplicada a metodologia de Algoritmo Genético.

5.1 Programação Linear

A Programação Linear consiste em um método de otimização nos quais suas restrições e Função Objetivo são lineares, de acordo com Haupt e Haupt (2004)

O modelo é implementado e resolvido no Matlab com a função *linprog* que se encontra dentro do *toolbox* de otimização. Para execução do fluxo de potência, foi utilizado o programa OpenDSS, com a finalidade de calcular as sensibilidades das Equações 4.6 e 4.7.

5.1.1 Metodologia Utilizada para o Modelo 1

Passo 1: Definir, inicialmente, as seguintes variáveis: as potências de carregamento entregues a cada VE ($P_{EV_i}^t$), restrito pela Equação 4.2, as tensões nas barras (V_i^t), restrita pela Equação 4.4, e o carregamento do transformador (L_T^t), limitada pela Equação 4.5. Definem-se a priori os valores do vetor x_i da Equação 4.1 para determinar quais VEs estão carregando em seus devidos intervalos de tempo.

Passo 2: O intervalo de tempo analisado é igual a 1.

Passo 3: Execução do fluxo de potência, no intervalo de tempo analisado (via OpenDss) sem VEs conectados, para coletar os valores iniciais de tensão nas barras ($V_{inic_i}^t$) e o carregamento do transformador no intervalo de tempo analisado (L_T^t).

Passo 4: Execução do fluxo de potência, via OpenDss, para o VE conectado somente na barra i , para calcular as sensibilidades de tensão e carregamento através das Equações 4.6, 4.7 e 4.9.

Passo 5: Se houver outra barra, passa para a próxima barra e retorna para o Passo 4, se não, passa para o Passo 6.

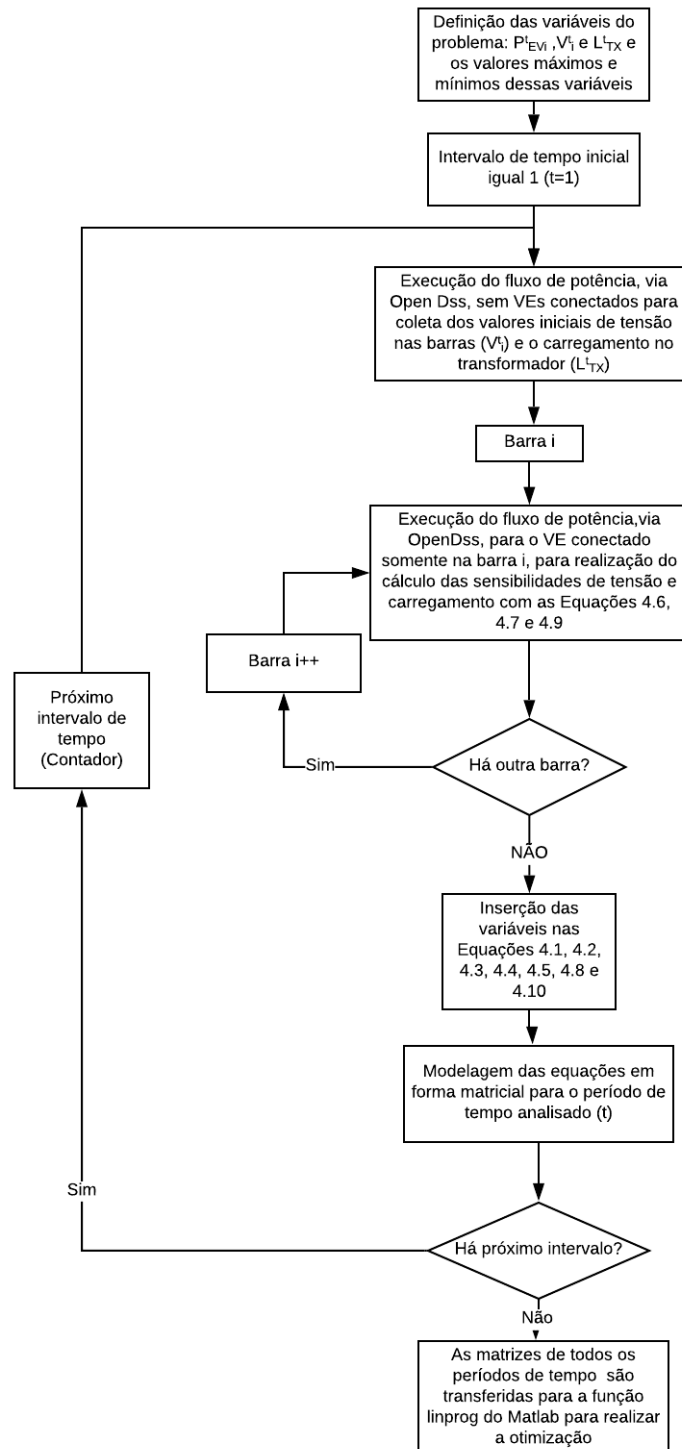
Passo 6: Inserção das variáveis nas Equações 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.8 e 4.10 e em seguida é feita a modelagem dessas equações em forma matricial para o período de tempo analisado (t).

Passo 7: É verificado se há próximo intervalo de tempo. Caso haja, retorna ao passo 3, se não, passa para o passo 8

Passo 8: As matrizes de todos os períodos de tempo são transferidas para a função *linprog* do Matlab para realizar a otimização.

O processo pode ser visto de forma simplificada pelo fluxograma da Figura 16.

Figura 16 – Metodologia para otimização do carregamento.



Fonte: Do Autor.

Após a otimização, o carregamento dos VEs é feito de forma controlada de acordo com as restrições do sistema a cada intervalo de tempo. Os resultados dessa otimização são comparados no capítulo a seguir com os resultados do sistema sem otimização.

5.2 Algoritmo Genético para o Carregamento de VEs

Nesta seção é mostrada a metodologia utilizada para o Modelo 2, a qual foi baseado no texto de Mehta et al. (2018).

O Algoritmo Genético segue o processo de seleção natural que começa com uma população inicial aleatória e através de operadores como: seleção, cruzamento, mutação e elitismo encontra a melhor estratégia depois de várias gerações de acordo com o Haupt e Haupt (2004). Para agilizar a busca do algoritmo é empregada uma inicialização heurística, cumprindo restrições que serão mencionadas posteriormente.

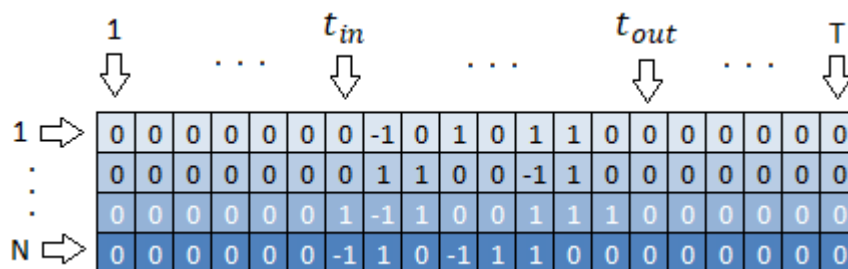
5.2.1 Representação do Cromossomo

Um cromossomo é representado por uma matriz ($N \times T$), em que N é o número de estratégias de carregamento de um determinado PEV que chega ao estacionamento em um determinado período de tempo t (por exemplo: $t = 1, 2, 3, \dots, 24$ horas) e T é o numero total de intervalos de tempo. É necessário também, definir o número de VEs que estão conectados ao sistema. Esse número é tratado neste trabalho como níveis de penetração, que representa distintas quantidades de VEs que estão carregando simultâneamente em um local (por exemplo 5, 10, 20, 30, 50, 100, 200, 500, 700) que tem capacidade para 1000 VEs. Quanto maior o nível de penetração, maior a quantidade de carros conectados no sistema.

Na Figura 17 é mostrado um exemplo do que seria um cromossomo, no qual cada linha representa um vetor de estratégia de carregamento de um determinado PEV ao longo do tempo (MEHTA et al., 2018). Os intervalos de tempo em que os VEs chegam e saem do estacionamento, são representados por t_{in} e t_{out} respectivamente.

Os cromossomos são formados à partir de combinações da FSM (*do inglês: Feasible Strategy Matrix*). A FSM representa um conjunto de estratégias viáveis para cada VE. Esses cromossomos, quando agrupados, formam a população inicial. Esse processo de formação da população inicial, obtida através de combinações da FSM, será explicado posteriormente.

Figura 17 – Cromossomo.



Fonte: Do Autor.

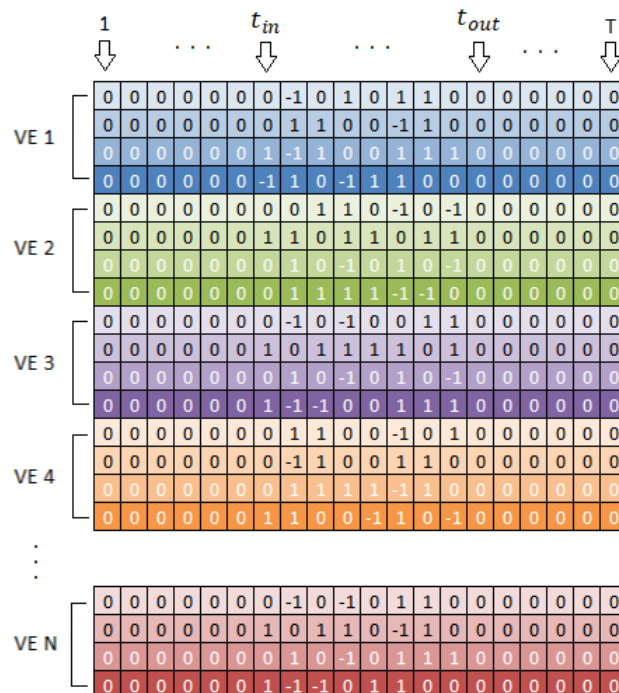
5.2.2 Inicialização Heurística

As estratégias são criadas da seguinte forma:

1. Os vetores fila da matriz FSM, são primeiramente preenchidos com zeros. Quando o veículo precisa ser recarregado, as posições entre o tempo de entrada (t_{in}) e tempo de saída (t_{out}) são escolhidas aleatoriamente e preenchidas com 1. Da mesma forma é feito para quando o veículo pode fornecer energia ao sistema, trocando-se apenas o valor por -1. Esse processo é feito em um vetor de cada vez, até formar a FSM.
2. Após o preenchimento de cada vetor fila, é verificada a condição da equação 4.16. Se tal condição não for cumprida o vetor é gerado novamente até que se cumpra essa restrição.
3. Quando a condição da equação 4.16 é atendida, é verificada a restrição da equação 4.18, que indica que o SOC da bateria tem que se encontrar dentro de um limite especificado para cada intervalo de tempo. Se essa condição não for atendida, o vetor fila da FSM é gerado novamente e volta ao primeiro item.

Dessa forma é criada a FSM (*do inglês: Feasible Strategy Matrix.*), mostrada na Figura 18, que é uma matriz formada por um conjunto de estratégias factíveis para cada VE.

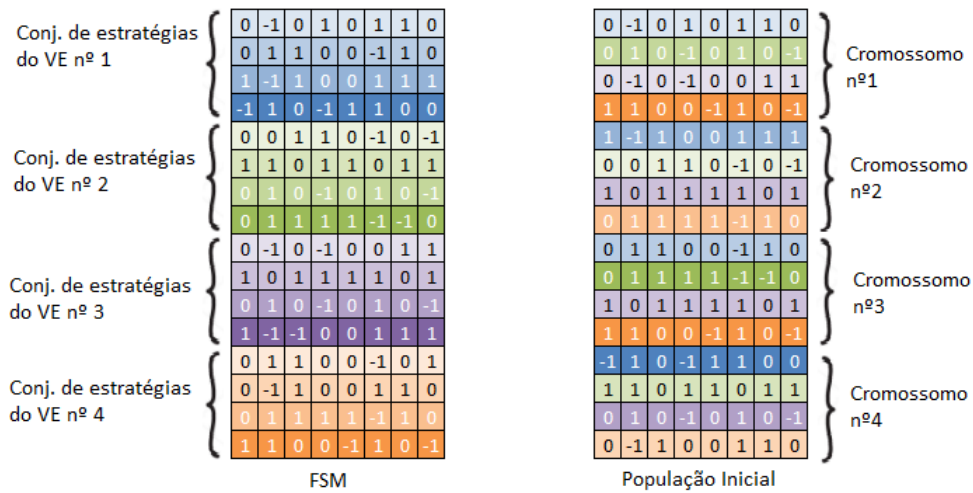
Figura 18 – FSM.



Fonte: Do Autor.

Para criar a população inicial, onde será aplicado o algoritmo genético, é definida uma matriz, que neste trabalho, foi considerada de mesmo tamanho da FSM, mas poderia ser de tamanho diferente. A população inicial é formada por N cromossomos. Para gerar uma linha de número "n" de um cromossomo da população inicial, escolhe-se aleatoriamente qualquer linha de um conjunto de estratégias do VE de número "n" da FSM. Para facilitar o entendimento deste processo, foi criada uma ilustração, mostrada na Figura 19.

Figura 19 – Criação da População Inicial.



Fonte: Do Autor.

Nesta figura e nas próximas, para facilitar as ilustrações, serão mostrados apenas os valores envolvidos por t_{in} e t_{out} . Pode-se observar que para criar a linha '1' do primeiro cromossomo da população inicial, escolhe-se aleatoriamente qualquer linha do conjunto de estratégias do VE de número '1' da FSM. Para criar a linha '2' do primeiro cromossomo da população inicial, escolhe-se aleatoriamente qualquer linha do conjunto de estratégias do VE de número '2' da FSM, e assim por diante. Quando finalmente chega-se no segundo cromossomo da população inicial, o processo se repete.

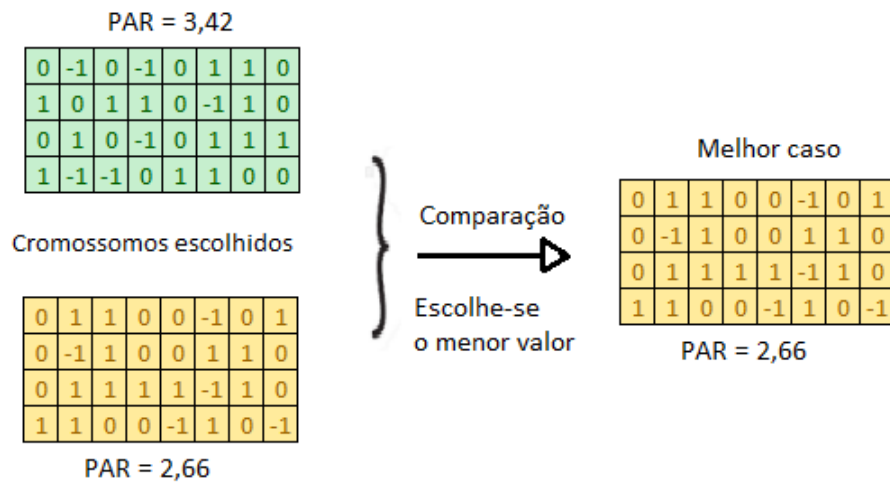
5.2.3 Algoritmo Genético para o Carregamento de VEs

A implementação do AG é feita a partir dos seguintes operadores: seleção, cruzamento, mutação e elitismo.

5.2.3.1 Seleção

O processo de seleção utilizado nesse trabalho é o torneio binário, de acordo com Haupt e Haupt (2004). Ele consiste na escolha aleatória de dois cromossomos da população inicial e seleciona o que tiver o melhor resultado da Função Objetivo, ou seja, o menor valor. Este processo é ilustrado na Figura 20.

Figura 20 – Processo de Seleção.

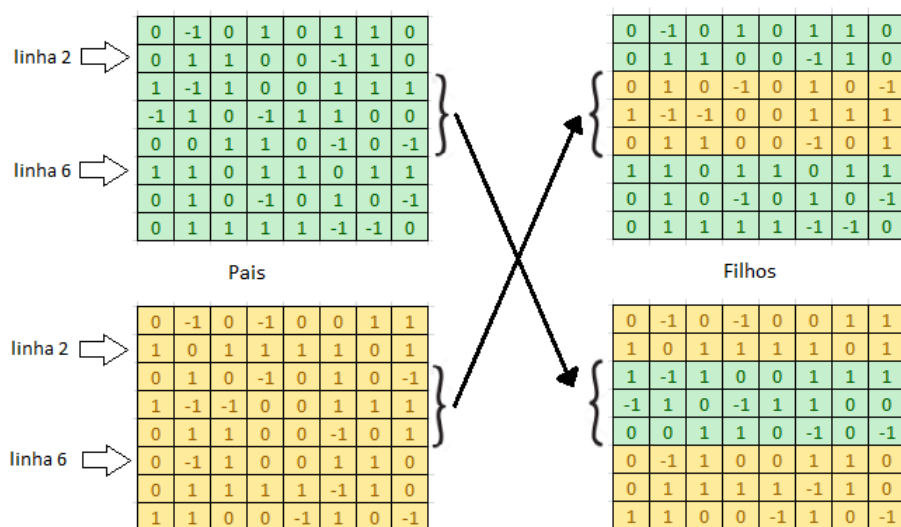


Fonte: Do Autor.

5.2.3.2 Cruzamento

Após o processo de seleção, é feito o cruzamento que funciona da seguinte forma: são selecionados aleatoriamente dois pais e é feito um cruzamento entre eles gerando dois filhos. O cruzamento é feito selecionando-se aleatoriamente duas linhas dos cromossomos, e o conteúdo que está entre essas duas linhas selecionadas, que são iguais para os dois pais, são trocadas entre si, gerando-se dois filhos (HAUPT; HAUPT, 2004). Como exemplo, esse processo é ilustrado na Figura 21, na qual as linhas 2 e 6 foram selecionadas.

Figura 21 – Processo de Cruzamento.

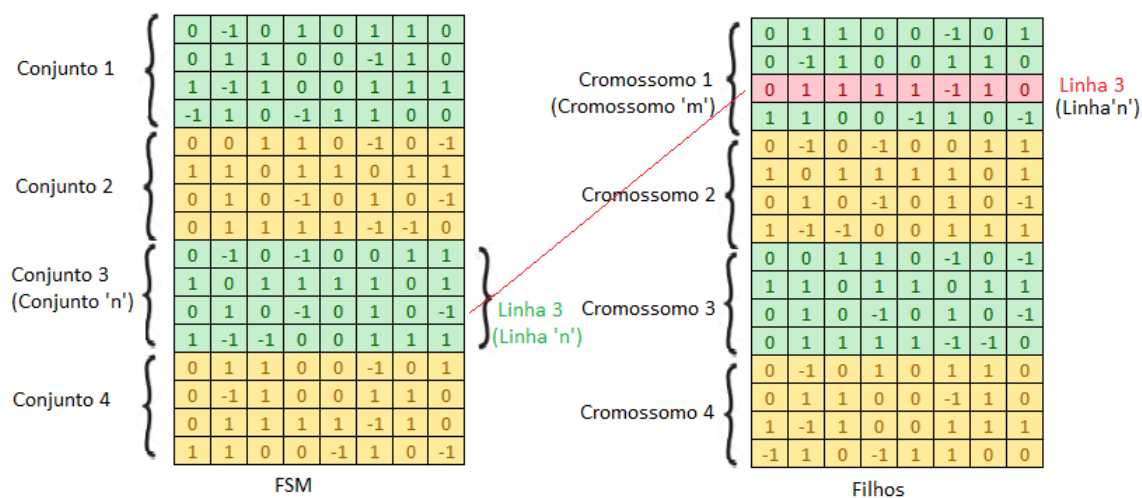


Fonte: Do Autor.

5.2.3.3 Mutação

No processo de mutação: cada linha dos cromossomos, ou seja, a população de filhos, tem a probabilidade de sofrer uma mutação de 1%. Quando ocorre a mutação em uma linha "n" de um cromossomo "m" qualquer, essa linha é trocada com uma linha "n" do conjunto de estratégias de número "n" da FSM. Como exemplo do processo, mostrado na Figura 22, a linha '3' do cromossomo '1' sofre uma mutação. Portanto, essa linha deve ser trocada com a linha '3' do conjunto de estratégias '3' da FSM.

Figura 22 – Mutação.



Fonte: Do Autor.

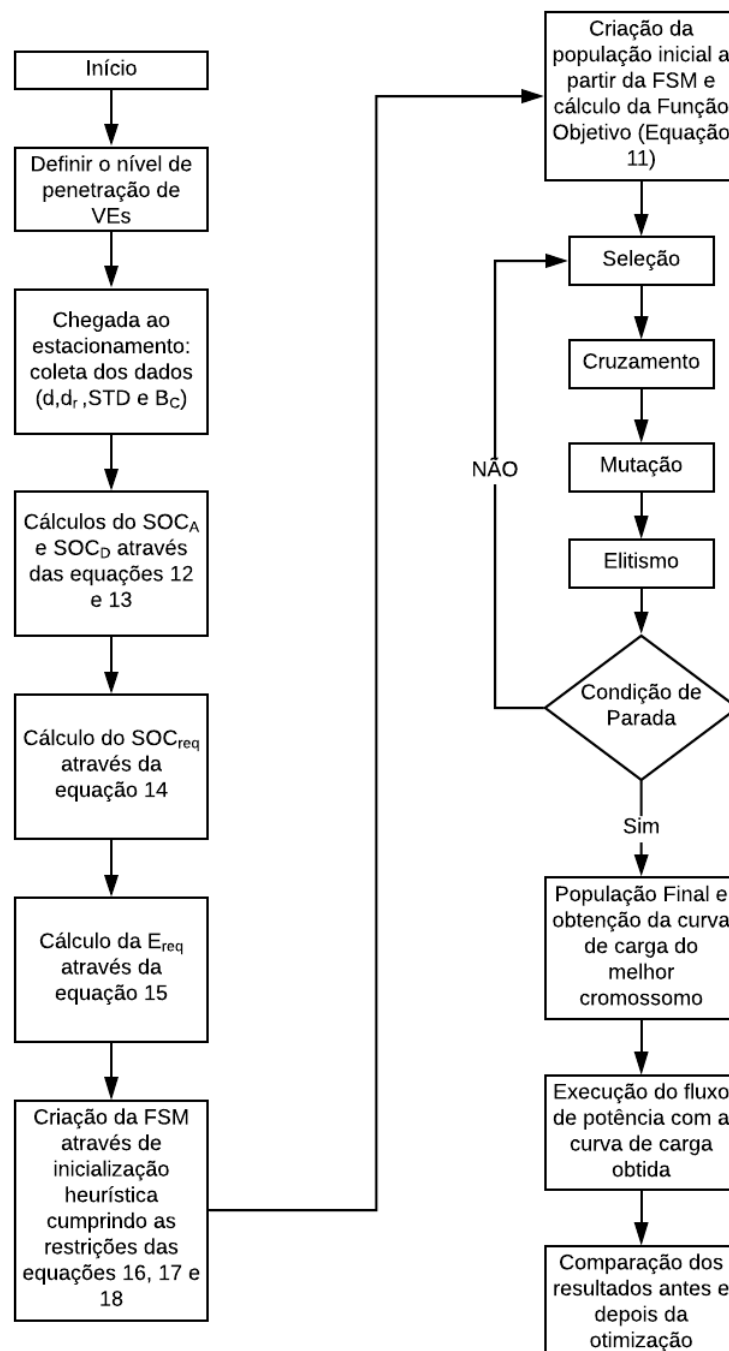
5.2.3.4 Elitismo

O Elitismo baseia-se na sobrevivência dos mais aptos, ou seja, no descarte dos cromossomos com os piores resultados. Apenas os melhores são selecionados para dar continuidade à próxima geração. Decidir quantos cromossomos manter é arbitrário, de acordo com o livro de Haupt e Haupt (2004). O pior caso é trocado com o melhor da população inicial (pais) antes de passar para a próxima iteração do AG (seleção). Neste trabalho, foi descartado apenas um cromossomo por geração, que continha o maior valor de resultado da Função Objetivo. Isso é feito trocando-se o cromossomo que tem o pior resultado da Função Objetivo (maior valor) pelo cromossomo que tem o melhor resultado da população inicial (menor valor).

Todos os processos citados nos itens acima ocorrem para cada iteração do AG. A população de filhos que passou pelo último operador (elitismo) agora passa a ser tratada como população de pais para dar início a próxima iteração do processo, que aplica todos os operadores novamente (seleção, cruzamento, mutação e elitismo).

Na Figura 23, é mostrado um fluxograma que resume o processo que utiliza o Algoritmo Genético.

Figura 23 – Fluxograma do Algoritmo Genético.



Fonte: Do Autor.

5.2.3.5 Convergência do Algoritmo Genético

A partir de uma certa quantidade de gerações, os cromossomos e seus resultados da Função Objetivo, se tornariam os mesmos de uma geração para outra, ou não apresentariam melhorias, se não fosse pela mutação. Neste ponto, o algoritmo deve ser parado,

de acordo com Haupt e Haupt (2004). Neste trabalho, foi criada uma condição, no qual o algoritmo finaliza a execução, caso não obtivesse melhores resultados dentro de um limite de iterações pré-definido.

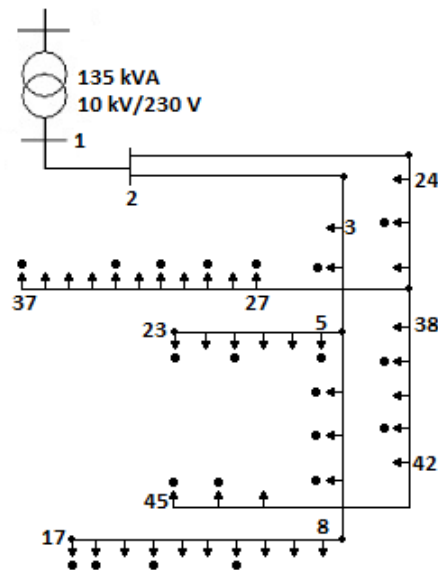
6 Resultados

Neste capítulo serão mostrados os resultados das duas metodologias discutidas anteriormente.

6.1 Resultados para o Modelo 1

De acordo com Richardson, Flynn e Keane (2012), o sistema de teste é baseado em uma rede de distribuição residencial da Irlanda, que foi adaptada para uma rede monofásica neste trabalho. A sua representação simplificada é mostrada na Figura 24. O modelo incorpora um transformador de 135 kVA, 10/0,23 kV, que supre um sistema com 45 clientes residenciais nos quais, 22 destes clientes possuem VEs, representados pelos círculos na Figura 24. Os dados deste sistema adaptados podem ser vistos no Apêndice A.

Figura 24 – Sistema Elétrico do Modelo 1.



Fonte: Do Autor.

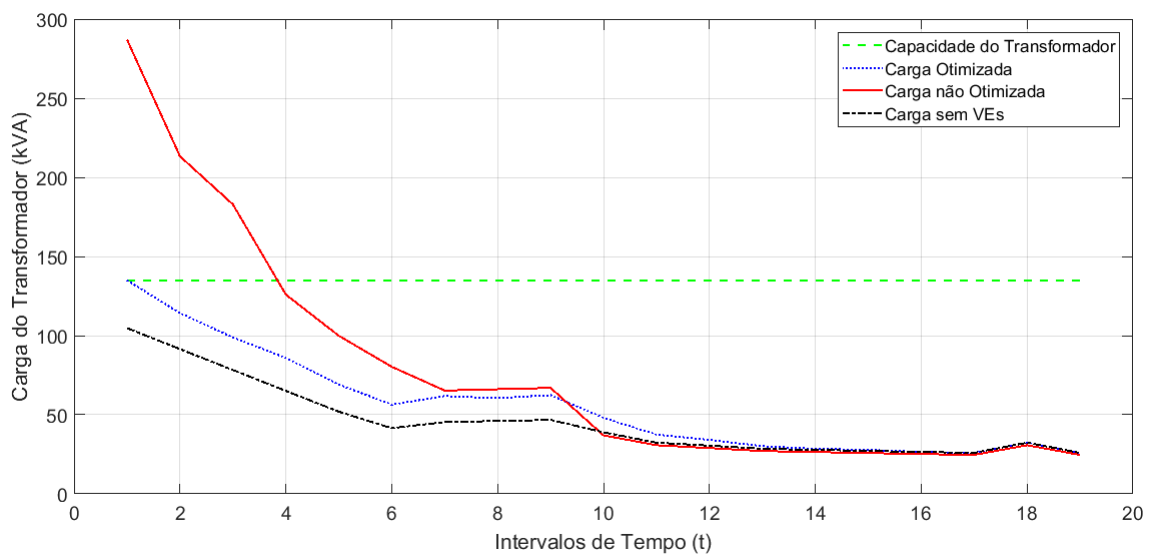
É importante ressaltar algumas informações para o melhor entendimento dos resultados a seguir:

- Os intervalos de tempo (t) analisados são compreendidos das 22 horas até as 7 horas da manhã do dia seguinte, com passos de 30 minutos;
- O valor limite do carregador, sendo o $P_{EV_i}^{max}$ da Equação 4.2, fornece uma potência máxima de 4 kW;
- O valor de Δ , na Equação 4.3, é definido como 500 W;
- O sistema teste estudado, tem um valor de tensão monofásico de 230 V com uma tolerância de $\pm 10\%$, se adequando à Equação 4.4;
- A capacidade do transformador ($L_{TX_{max}}$), utilizada na Equação 4.5, é de 135 kVA;
- Como a otimização apresentou comportamento similar para todos os VEs, com o objetivo de simplificar os resultados e deixar viável o seu entendimento de forma gráfica, serão mostrados exemplos de quatro VEs com diferentes níveis de cargas iniciais;

Como o carregamento dos VEs foram supostos em um período noturno, quando o sistema elétrico residencial está pouco carregado, isso permitiu que todos os níveis de bateria dos veículos fossem completados.

Analisando a Figura 25, pode-se ver as diferentes curvas de carga para distintas situações.

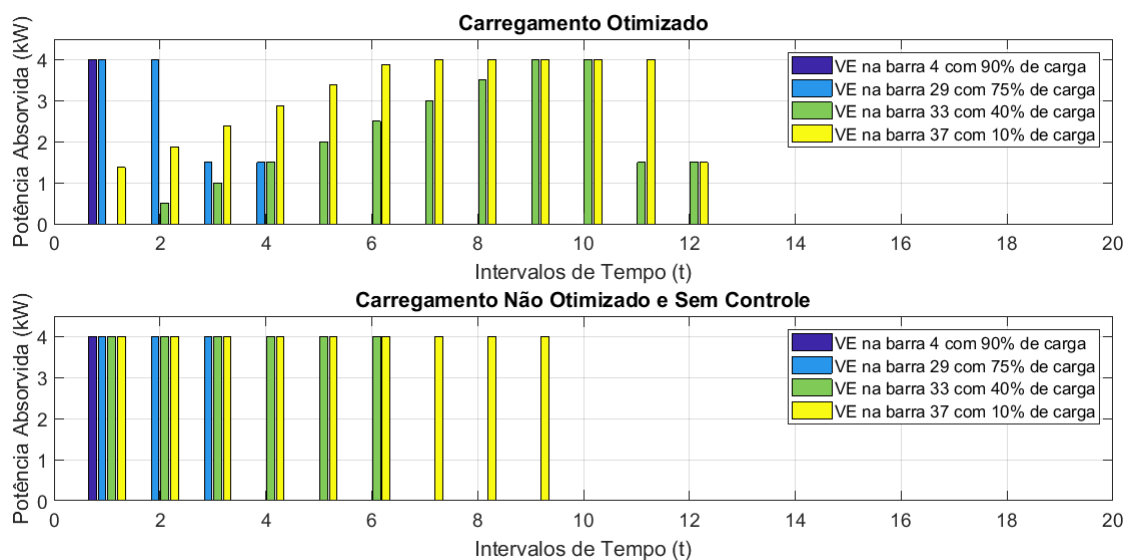
Figura 25 – Cenários de Carga do Transformador.



Fonte: Do Autor.

Na cor verde, tem-se a reta da capacidade do transformador, conectado à este sistema elétrico. Na cor preta, pode-se ver a curva de carga do sistema elétrico sem VEs conectados. Quando a carga não é otimizada e nem controlada, percebe-se, pela curva vermelha, que o limite do transformador é extrapolado nos instantes iniciais, pois como o carregamento não é controlado, todos VEs carregam em plena carga máxima de 4 kW e consequentemente completam seus níveis de carga mais rapidamente. Esse carregamento sem controle e não otimizado pode ser observado na Figura 26. As porcentagens na legenda desta Figura, representam o nível de carga inicial da bateria de cada VE antes de começar a carregar.

Figura 26 – Carregamento dos VEs.



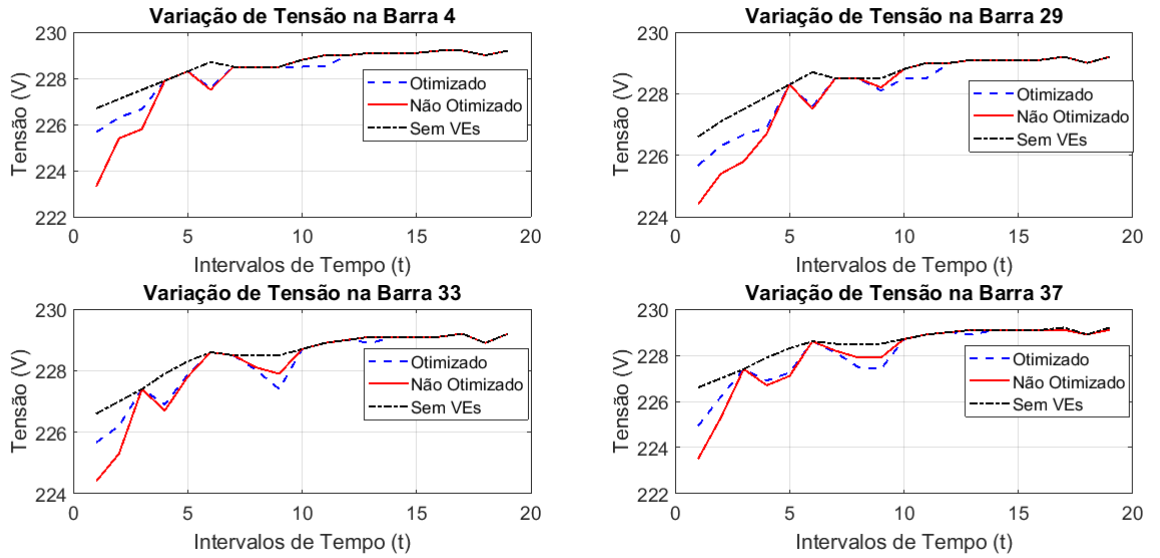
Fonte: Do Autor.

Ainda na Figura 25, pode-se observar, quando o carregamento é otimizado, que a carga do transformador não ultrapassa seu limite e à medida que o transformador fica menos sobrecarregado, é permitido que os VEs atinjam uma taxa de carregamento maior, como é observado na Figura 26. Quando as baterias atingem os 95% da capacidade de carga, essa taxa é reduzida para 1,5 kW até o nível ser completado.

O algoritmo de carregamento também mantém os níveis de tensão da rede nos limites pré-estabelecidos. O resultado após a otimização é mostrado na Figura 27.

Na cor preta tem-se a curva das quedas de tensão do sistema quando não há VEs elétricos conectados. Quando os VEs elétricos são conectados sem otimização e controle, pode-se ver pela curva vermelha os piores níveis de quedas de tensão. Quando o carregamento é otimizado, as quedas de tensão são menores. Também pode-se observar que as quedas de tensão, mesmo quando não houve otimização, foram menores que o limite pré-estabelecido de $\pm 10\%$ de 230 V. Portanto, com a finalidade de ilustrar a que o algoritmo

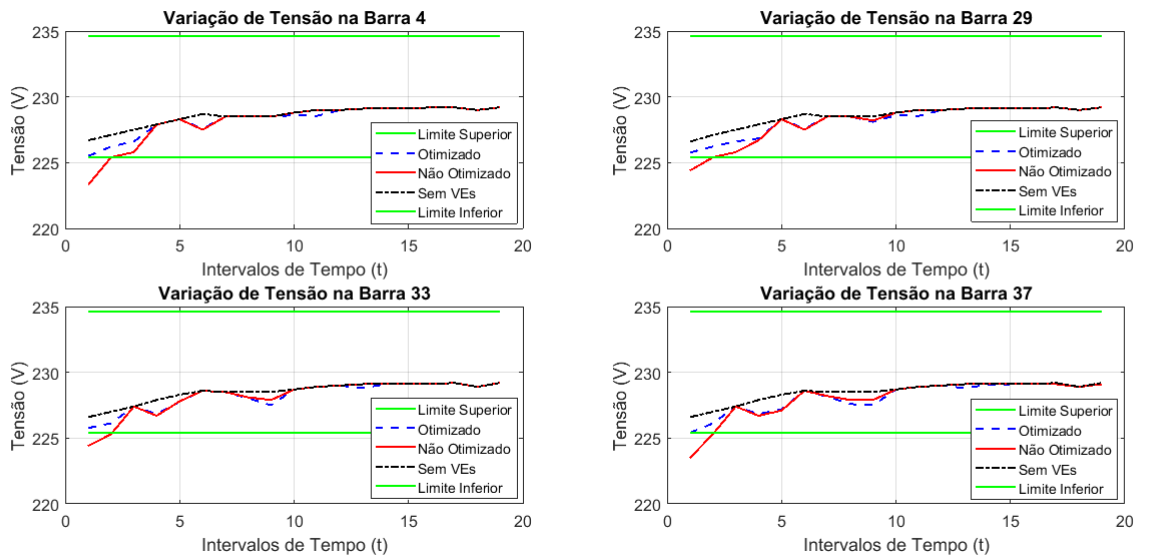
Figura 27 – Variação de Tensão com Limites de $\pm 10\%$.



Fonte: Do Autor.

é capaz de otimizar através das quedas de tensão, os limites foram ajustados para $\pm 2\%$ de 230 V. O resultado dessa otimização é mostrado na Figura 28.

Figura 28 – Variação de Tensão com Limites de $\pm 2\%$.



Fonte: Do Autor.

Também pode-se observar, tanto na Figura 25 quanto na Figura 27, que cada curva apresenta comportamentos diferentes quando seus intervalos de tempo compreendem momentos em que os VEs ainda não tiveram suas cargas completadas. No entanto, a partir do instante que todos os VEs elétricos estão carregados, tanto as curvas de carga

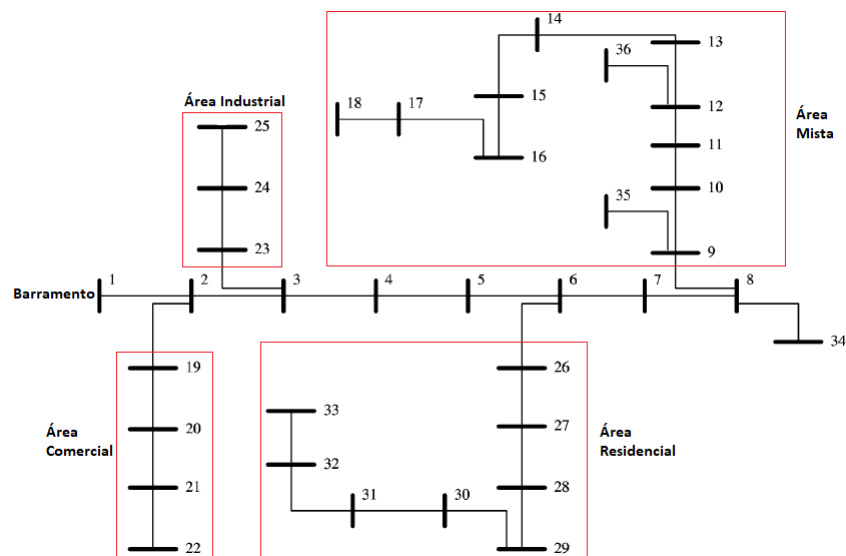
quanto as de quedas de tensão, apresentam comportamentos idênticos, pois os VEs já não consomem mais energia do sistema.

6.2 Resultados para o Modelo 2

O objetivo deste método é minimizar a relação entre a demanda máxima e a demanda média da curva de carga do sistema de distribuição.

Essa estratégia de carregamento inteligente proposta é implementada no estacionamento de um setor industrial conectada a um sistema de distribuição de 11 kV e 36 barras, mostrado na Figura 29.

Figura 29 – Sistema Elétrico do Modelo 2.

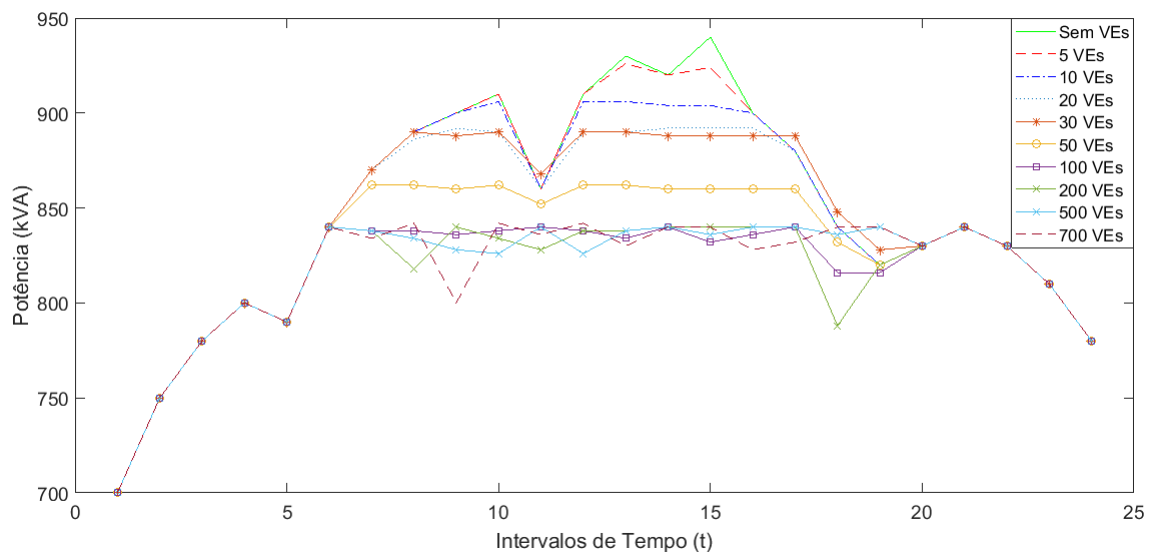


Fonte: Adaptado de Singh, Misra e Singh (2007).

É considerado um transformador de distribuição com capacidade de 1 MVA para fornecer energia ao setor industrial e a potência absorvida por cada VE é de 2 kW. Os dados das linhas e das cargas das barras de todo o sistema podem ser encontrados nos artigos de Singh, Misra e Singh (2007) e Baran e Wu (1989) e no Apêndice B.

Na primeira análise, foi criada uma FSM no qual os VEs chegam ao estacionamento, que tem capacidade de mil VEs, com a finalidade de fornecer ou absorver energia do sistema elétrico. Porém, como o objetivo do algoritmo é obter um resultado que cause o menor impacto ao sistema elétrico, o melhor cromossomo tem a maioria dos VEs fornecendo energia ao sistema. Na Figura 30, é mostrado o resultado dessa otimização para diferentes níveis de penetração de VEs no sistema elétrico.

Figura 30 – Curvas de Cargas para Diferentes Níveis de Penetração.



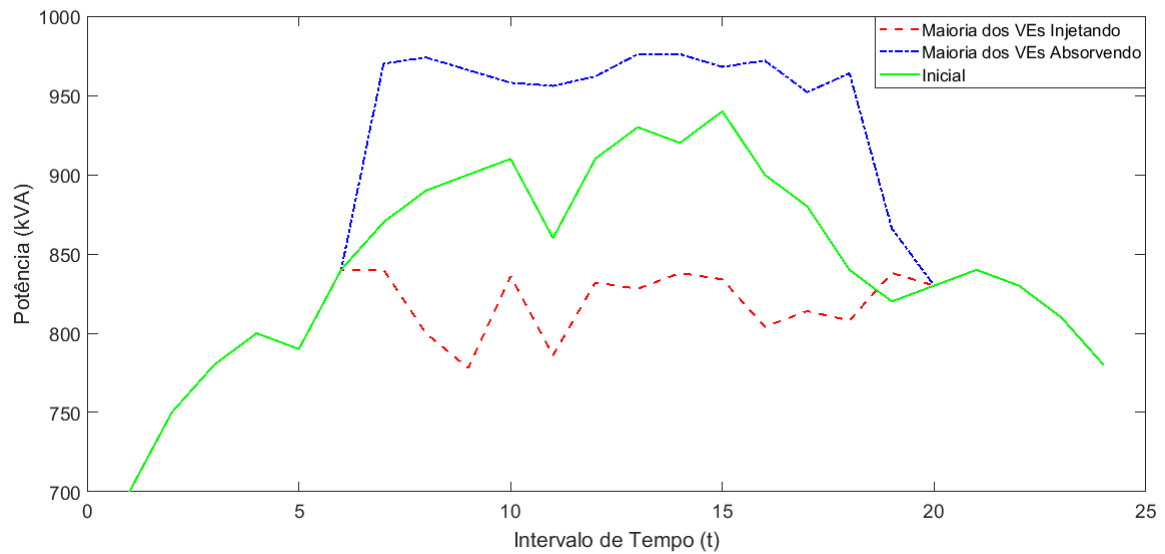
Fonte: Do Autor.

Pode-se ver que à medida que o número de VEs aumenta, menor é o pico e mais plana fica a curva de carga, pois devido à maior quantidade de VEs, o algoritmo tem mais opções de estratégias de carregamento, escolhendo assim o melhor caso.

Para uma segunda análise, foi criado uma FSM com proporção de 90 % dos VEs absorvendo energia do sistema e outra FSM com a mesma porcentagem de VEs injetando energia no sistema. Foram considerados 700 VEs no estacionamento. O resultado dessas duas situações é mostrado na Figura 31. Pode-se ver que, quando a maioria dos VEs está carregando, o algoritmo não é capaz de reduzir a curva de carga, devido a proporção de VEs absorvendo energia no sistema ser muito maior. Dessa forma sobra poucas opções para o algoritmo escolher os melhores casos. Mas pode-se perceber que o algoritmo ainda foi capaz de deixar a curva de carga mais plana, distribuindo de forma mais eficiente os momentos em que o VE carrega ao longo do tempo, que é uma das características deste algoritmo.

A seguir, na Tabela 3, são mostrados os valores de queda de tensão nas barras 23, 24 e 25. O resultados foram obtidos escolhendo arbitrariamente os resultados do nono instante de tempo, a fim de comparação. Pode-se observar, no caso em que a maioria dos VEs estão absorvendo energia, há uma queda de tensão em relação a curva inicial (sem

Figura 31 – Curvas de Carga do Sistema.



Fonte: Do Autor.

VEs). Quando a maioria dos VEs estão injetando energia no sistema, as quedas de tensão são menores do que as quedas de tensão para a maioria dos VEs absorvendo e, também são menores que as quedas de tensão da curva inicial (sem VEs).

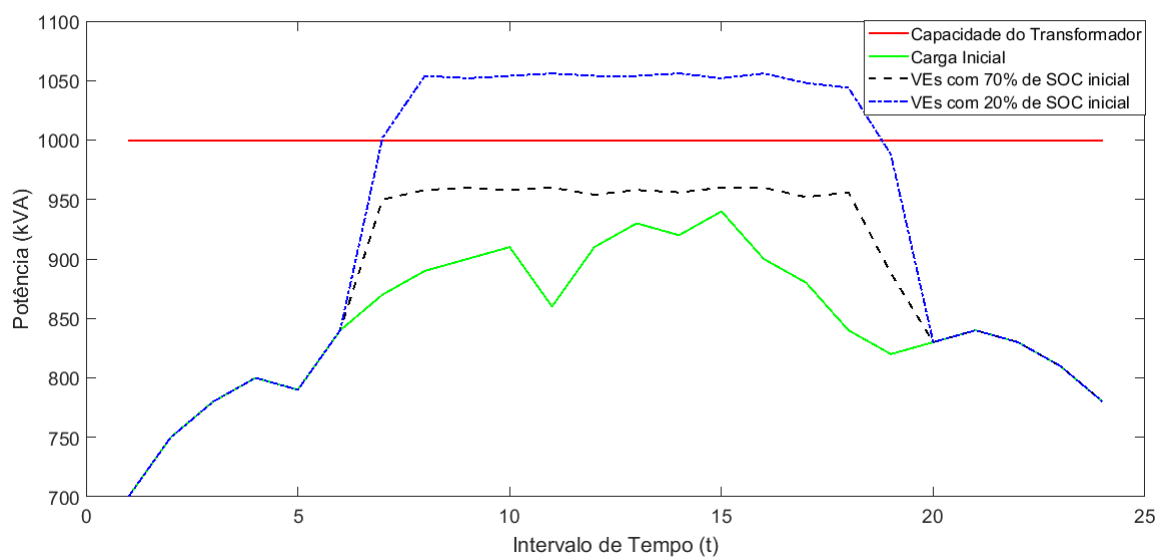
Tabela 3 – Quedas de Tensão no Instante de tempo = 9.

Barras	Sem VEs	Maioria dos VEs Absorvendo	Maioria dos VEs Injetando
23	10.64 kV	10.63 kV	10.66 kV
24	10.46 kV	10.44 kV	10.51 kV
25	10.37 kV	10.34 kV	10.43 kV

Fonte: Do autor.

Outra análise foi feita em relação ao comportamento do carregamento de 100 VEs. Primeiramente foi simulado um caso em que o SOC_A de todos os VEs são iguais a 20% e o SOC_D de todos são iguais a 100%, ou seja, os VEs chegam ao estacionamento com apenas 20% de carga na bateria e precisam completá-las. Também foi simulado uma situação em que todos os VEs tem o SOC_A iguais a 70% e o SOC_D de todos são iguais a 100%, ou seja, os VEs chegam com 70% de carga e precisam completá-las. Neste caso, como todos os VEs necessitam de energia, é apenas usado o modo G2V. Os resultados destas simulações são mostrados na Figura 32.

Figura 32 – Curvas de Carga com Níveis de Carga pré-estabelecidos.



Fonte: Do Autor.

Pode-se observar, que há um carregamento menor do transformador quando os VEs chegam ao estacionamento com os níveis de bateria em 70%, pois consequentemente a energia requerida (E_{req}) por eles são menores. No caso em que os VEs chegam ao estacionamento com apenas 20% de carga, pode-se ver que há uma sobrecarga do transformador, pois a E_{req} é bem maior que o caso anterior. Apesar de ocorrer sobrecarga no transformador, devido ao fato de todos os VEs operarem no modo G2V, pode-se perceber que essa metodologia ainda foi capaz de achatar a curva de carga, pois nesse modo citado anteriormente, é permitido que os VEs fiquem no modo ocioso, permitindo que o algoritmo escolha a melhor estratégia de carregamento para cada VE. Neste caso o algoritmo coloca os VEs em modo ocioso em momentos que o pico de carga é maior.

7 Conclusão

O carregamento de VEs tem impactos significativos no sistema de distribuição de energia. Se o carregamento não for realizado de forma controlada, pode ser necessário grandes investimentos para melhoria da infraestrutura dos sistemas de distribuição. A otimização feita pela programação linear permitiu um carregamento de forma controlada com o intuito de amenizar os impactos no sistema de distribuição e que os usuários carreguem seus veículos enquanto a rede foi mantida dentro do limite de operação aceitável. Este trabalho demonstrou que o carregamento dos VEs foi realizado de forma otimizada e cumpriu as restrições do sistema de distribuição. Tanto as tensões nas barras quanto a capacidade dos transformadores foram fatores limitantes à taxa de carregamento dos VEs.

O Algoritmo Genético demonstrou que, através da aplicação das tecnologias G2V e V2G, foi possível diminuir o carregamento do transformador de um determinado sistema elétrico. À medida que o nível de penetração aumentou e a quantidade de VEs que absorveram e injetaram energia no sistema foram similares, mais favorável se tornou os resultados para o sistema elétrico e os usuários de VEs puderam ser beneficiados vendendo essa energia de seus veículos para a concessionária de energia responsável. Quando a proporção de VEs que absorveram energia foi muito maior, o algoritmo não foi capaz de evitar a sobrecarga no sistema, mas foi capaz de deixar a curva de carga mais plana. Quando a proporção de VEs que injetaram energia no sistema foi muito maior, o transformador ficou menos carregado e a curva de carga se tornou mais plana.

Referências

- ALJANAD, A.; MOHAMED, A. Impact of Plug-in Hybrid Electric Vehicle on Power Distribution System Considering Vehicle to Grid Technology: A Review. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, Maxwell Scientific Publication Corp., v. 10, n. 1, p. 50–59, 2015. 3, 4
- BARAN, M. E.; WU, F. F. Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, IEEE, v. 4, n. 2, p. 1401–1407, 1989. 46
- BARAN, R.; LEGEY, L. F. L. *Veículos elétricos: história e perspectivas no Brasil*. 2010. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/1489/3/A%20BS%2033%20Ve%C3%ADculos%20el%C3%A9tricos%20-%20hist%C3%B3ria%20e%20perspectivas%20no%20Brasil_P.pdf>. Acesso em: 28 Jun. 2018. 6, 7
- CPFL. *Conector SAE J1772*. 2018. Conector SAE J1772. Disponível em: <<https://www.cpfl.com.br/sites/mobilidade-eletrica/mobilidade-e/tipos-de-plug/Paginas/Tipo%201%20-%20SAE-J1772.aspx>>. Acesso em: 24 mai. 2018. 17, 18
- ESPOSITO, F. *A Sub-Optimal Energy Management Strategy for Hybrid Electric Vehicles*. Dissertação (Tese de Doutorado) — Università Degli Studi di Napoli Federico II, 2008. 8, 10
- GE. *Soluções para Carregamento de Veículos Elétricos*. 2012. Soluções para Carregamento de Veículos Elétricos. Disponível em: <https://www.geindustrial.com.br/download/catalogs/GE_DuraStation.pdf>. Acesso em: 09 jul. 2018. 18, 19
- HAUPT, R. L.; HAUPT, S. E. *Practical Genetic Algorithms*. [S.l.]: John Wiley and Sons, Inc., Publication, 2004. 32, 35, 37, 38, 39, 41
- HU, J. *Control strategies for power distribution networks with electric vehicles integration*. Dissertação (Tese de Doutorado) — Technical University of Denmark, 2014. 2, 4
- II, R. C. G.; WANG, L.; ALAM, M. The Impact of Plug-in Hybrid Electric Vehicles on Distribution Networks: a Review and Outlook. *IEEE*, IEEE, v. 15, n. 1, p. 544–553, 2010. 2, 4
- JAYASHREE, S.; MALARVIZHI, D. K.; PRADEEP, R. Impact of Hybrid Electric Vehicle Penetration and its Challenges on Distribution System. *AENSI*, AENSI Publication, v. 11, n. 5, p. 101–108, 2017. 3, 5
- JR, W. D. S. *Elementos de Análise de Sistemas de Potência*. [S.l.]: McGraw-Hill, 1986. 22, 23, 24
- KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B. de; ROBBA, E. J. *Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica*. [S.l.]: Editora Blucher, 2005. 21
- MA, Y. et al. The analysis of the battery electric vehicle’s potentiality of environmental effect: A case study of Beijing from 2016 to 2020. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, v. 145, n. 1, p. 395–406, 2017. 7

- MEHTA, R. et al. Smart Charging Strategies for Optimal Integration of Plug-In Electric Vehicles Within Existing Distribution System Infrastructure. *IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID*, IEEE, v. 9, n. 1, p. 1–14, 2018. 3, 5, 25, 28, 29, 35
- OSORIO, V. A. G. *Carregamento Ótimo de Veículos Elétricos Considerando as Restrições das Redes de Distribuição de Média Tensão*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho, 2013. 1, 8, 9, 11, 13, 16, 17, 18, 19, 20
- PAPADOPOULOS, P. *INTEGRATION OF ELECTRIC VEHICLES INTO DISTRIBUTION NETWORKS*. Dissertação (Tese de Doutorado) — Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho, 2012. 2, 4
- REDDY, G. H.; GOSWAMI, A. K.; CHOUDHURY, N. B. D. Impact of plug-in electric vehicles and distributed generation on reliability of distribution systems. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Elsevier, v. 21, n. 5, p. 50–59, 2018. 3, 5
- RICHARDSON, P.; FLYNN, D.; KEANE, A. Optimal Charging of Electric Vehicles in Low-Voltage Distribution Systems. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, IEEE, v. 27, n. 1, p. 1–12, 2012. 2, 4, 22, 25, 42
- SINGH, D.; MISRA, R.; SINGH, D. Effect os Load Models in Distributed Generation Planning. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, IEEE, v. 22, n. 4, p. 2204–2212, 2007. 46
- SYSTEMS, J. M. B. *Our Guide to Batteries*. 2017. Disponível em: <<http://www.jmbatterysystems.com/technology/our-guide-to-batteries>>. Acesso em: 24 mai. 2018. 14, 15, 16
- TAN, K. M.; RAMACHANDARAMURTHY, V. K.; YONG, J. Y. Integration of electric vehicles in smartgrid: A review on vehicle to grid technologies and optimization techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 53, n. 1, p. 720–732, 2016. 3, 4
- UL-HAQ, A. et al. Impact of Electric Vehicle Charging on Voltage Unbalance in an Urban Distribution Network. *Springer Science + Business Media Singapore*, CrossMark, n. 1, p. 1–10, 2015. 3, 4

APÊNDICE A – Dados do sistema do Modelo 1

Linha (O-D)	Comprimento (km)	R1 (Ω/km)	X1 (Ω/km)
1-2	0.190	0.032	0.014
2-3	0.0275	0.008	0.014
3-4	0.0425	0.012	0.003
4-5	0.0425	0.012	0.003
5-6	0.0325	0.0093	0.003
6-7	0.0325	0.0093	0.003
7-8	0.0325	0.0093	0.003
8-9	0.0171	0.00688	0.00122
9-10	0.0171	0.00688	0.00122
10-11	0.0171	0.00688	0.00122
11-12	0.0171	0.00688	0.00122
12-13	0.0171	0.00688	0.00122
13-14	0.0171	0.00688	0.00122
14-15	0.0171	0.00688	0.00122
15-16	0.0171	0.00688	0.00122
16-17	0.0171	0.00688	0.00122
5-18	0.0198	0.008	0.0015
18-19	0.0198	0.008	0.0015
19-20	0.0198	0.008	0.0015
20-21	0.0198	0.008	0.0015
21-22	0.0198	0.008	0.0015
22-23	0.0198	0.008	0.0015
2-24	0.0325	0.009	0.002
24-25	0.0196	0.00566	0.00133

25-26	0.0196	0.00566	0.00133
26-27	0.0196	0.00566	0.00133
27-28	0.02175	0.0087	0.0016
28-29	0.02175	0.0087	0.0016
29-30	0.02175	0.0087	0.0016
30-31	0.02175	0.0087	0.0016
31-32	0.02175	0.0087	0.0016
32-33	0.02175	0.0087	0.0016
33-34	0.02175	0.0087	0.0016
34-35	0.02175	0.0087	0.0016
35-36	0.02175	0.0087	0.0016
36-37	0.02175	0.0087	0.0016
27-38	0.0212	0.006	0.0016
38-39	0.0212	0.006	0.0016
39-40	0.0212	0.006	0.0016
40-41	0.0212	0.006	0.0016
41-42	0.0212	0.006	0.0016
42-43	0.02375	0.00675	0.00175
43-44	0.02375	0.00675	0.00175
44-45	0.02375	0.00675	0.00175

Fonte: Do autor.

O - Barra de origem

D - Barra de destino

R1 - Resistência de sequência positiva da linha

X1 - Reatância de sequência positiva da linha

APÊNDICE B – Dados do sistema do Modelo 2

Linha (O-D)	R1 (Ω)	X1 (Ω)
1-2	0.0922	0.0470
2-3	0.4930	0.2511
3-4	0.3660	0.1864
4-5	0.3811	0.1941
5-6	0.8190	0.7070
6-7	0.1872	0.6188
7-8	0.7114	0.2351
8-9	1.03	0.74
9-10	1.044	0.74
10-11	0.1966	0.0650
11-12	0.3744	0.1238
12-13	1.4680	1.155
13-14	0.5416	0.7129
14-15	0.5910	0.5260
15-16	0.7463	0.5450
16-17	1.289	1.721
17-18	0.7320	0.574
2-19	0.1640	0.1565
19-20	1.5042	1.3554
20-21	0.4095	0.4784
21-22	0.7089	0.9373
22-23	0.4512	0.3083
23-24	0.8980	0.7091
24-25	0.8960	0.7011

6-26	0.2030	0.1034
26-27	0.2030	0.1034
27-28	0.2842	0.1447
28-29	1.0590	0.9337
29-30	0.8042	0.7006
30-31	0.5075	0.2585
31-32	0.9744	0.9360
32-33	0.3105	0.3619
8-34	0.3410	0.5302
9-35	2	2
12-36	2	2
18-37	0.5	0.5
25-38	0.3	0.5

Fonte: Do autor.

O - Barra de origem

D - Barra de destino

R1 - Resistência de sequência positiva da linha

X1 - Reatância de sequência positiva da linha



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Colegiado do Curso de Engenharia de Elétrica

TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado “Carregamento Ótimo de VEs em Redes de Distribuição de Baixa Tensão” é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem a devida citação ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 18 de Dezembro de 2019 .

Caioque Sulivam Cordeiro Costa
Nome completo do(a) aluno(a)