

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA

GUSTAVO IANNACONE DI MAIO SILVA

Carregamento Coordenado de Veículos Elétricos para Mitigar
Desbalanceamento de Carga em Grandes Consumidores de
Energia

JUIZ DE FORA

2017

GUSTAVO IANNAcone DI MAIO SILVA

Carregamento Coordenado de Veículos Elétricos para Mitigar Desbalanceamento de Carga em Grandes Consumidores de Energia

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Engenheiro Eletricista.

Orientadora: Prof. Bruno Henriques Dias

JUIZ DE FORA

2017

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração
automática da Biblioteca Universitária da UFJF,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Iannacone Di Maio Silva, Gustavo.

Carregamento Coordenado de Veículos Elétricos para Mitigar
Desbalanceamento de Carga em Grandes Consumidores de Energia /
Gustavo Iannacone Di Maio Silva. -- 2017.

53f.

Orientador: Bruno Henriques Dias

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de
Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2017.

1. Desbalanceamento de Fases. 2. Veículos Elétricos. 3. Sistemas de
Distribuição. I. Henriques Dias, Bruno, orient. II. Título.

GUSTAVO IANNAcone DI MAIO SILVA

Carregamento Coordenado de Veículos Elétricos para Mitigar Desbalanceamento de Carga em Grandes Consumidores de Energia

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Engenheiro Eletricista.

Orientadora: Prof. Bruno Henriques Dias

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Bruno Henriques Dias, D.Sc.
Universidade Federal de Juiz de Fora, UFJF
Orientadora

Prof. Leonardo Willer de Oliveira, D.Sc.
Universidade Federal de Juiz de Fora, UFJF

Eng. Edgar Bellini Xavier
Universidade Federal de Juiz de Fora, UFJF

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Bruno pela oportunidade, confiança, atenção e conhecimento que auxiliaram a elaboração desse trabalho.

Aos meus pais, Adriano e Sônia, e à minha irmã, Letícia, pelo amor, dedicação e suporte.

À minha namorada, Paola, cuja ajuda e sabedoria contribuíram para o desenvolvimento do projeto, além do amor, paciência e companheirismo.

A toda a minha família e amigos, que sempre estiveram comigo, apoiando e incentivando.

A todos os professores, que compartilharam seus conhecimentos e contribuíram para minha formação profissional, acadêmica e também pessoal.

RESUMO

Em sistemas de distribuição de baixa tensão, é comum a observação de problemas como o desbalanceamento de fases, que tem como uma de suas principais causas a distribuição desigual de cargas monofásicas entre as fases deste sistema. Este desequilíbrio pode levar a problemas de qualidade de energia como perdas por efeito Joule e afundamentos de tensão.

Um dos fatores que poderia contribuir para este problema nos próximos anos seria a presença de veículos elétricos sendo conectados de forma descoordenada entre as fases de um sistema de baixa tensão.

Este problema poderia ocorrer de maneira mais significativa em grandes consumidores de energia como *Shopping Centers*, que poderiam oferecer postos de carregamento em seus estacionamentos.

Dessa forma, este trabalho estuda os possíveis impactos do carregamento coordenado e descoordenado de veículos elétricos em um *Shopping Center*. Além disso, também é apresentada uma metodologia, que visa reduzir o desbalanceamento através da alocação coordenada de VEs entre as fases do sistema elétrico desde *Shopping Center*.

ABSTRACT

It is common to observe phase unbalance problems in low voltage distribution systems. One of the main causes of this problem is the uneven distribution of single-phase loads among the phases of this system. In addition, the unbalance may lead to energy quality problems such as Joule effect and voltage sags.

The high penetration of electric vehicles unevenly connected among the phases of a low voltage system might be one of the factors that could contribute to the unbalance problem within the next years.

This problem could happen more often in large energy consumers such as shopping centers, which could offer charging points on its parking lots.

Therefore, this paper studies the impacts of the coordinated and uncoordinated charging of EVs in a shopping center. Besides, it is also presented a methodology proposed by SILVA (2017). This methodology aims to reduce the unbalance through the coordinated allocation of EVs among the phases of the shopping center's electric system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Curva de Carga.....	24
Figura 2. Fluxo de horário de veículos por dia.....	25
Figura 3. Fluxograma da Metodologia de carregamento descoordenado.....	27
Figura 4. Fluxograma da metodologia de carregamento coordenado	29
Figura 5. Desbalanceamento natural do Shopping Center em uma quarta-feira.....	33
Figura 6. Resultados das simulações para quarta-feira com carregamento descoordenado	34
Figura 7. Resultados das simulações para quarta-feira com carregamento coordenado	36
Figura 8. Desbalanceamento natural de sexta-feira.....	37
Figura 9. Resultados das simulações para sexta-feira com carregamento descoordenado.....	38
Figura 10. Resultados das simulações para sexta-feira com carregamento coordenado	39
Figura 11. Desbalanceamento natural do sistema para sábado	40
Figura 12. Resultados das simulações para sábado com carregamento descoordenado	41
Figura 13. Resultados das simulações para sábado com carregamento coordenado.....	42
Figura 14. Desbalanceamento natural para domingo	44
Figura 15 . Resultados das simulações para domingo com carregamento descoordenado	45
Figura 16. Resultados das simulações para domingo com carregamento coordenado.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Simulações realizadas.....	32
Tabela 2. Mínima e máxima corrente de neutro em porcentagem da corrente normal, considerando 10% de penetração de veículos elétricos.....	47
Tabela 3. Mínima e máxima corrente de neutro em porcentagem da corrente normal, considerando 40% de penetração de veículos elétricos.....	47

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	V
RESUMO	VI
ABSTRACT	VII
LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS.....	IX
SUMÁRIO.....	X
Capítulo 1 Introdução.....	12
1.1 Contextualização.....	12
1.2 Objetivo.....	12
1.3 Revisão Bibliográfica.....	13
Capítulo 2 Premissas Básicas e Conceitos Iniciais	17
2.1 Introdução.....	17
2.2 Desbalanceamento de Tensão	17
2.2.1 Consequências do Desbalanceamento de Tensão.....	18
2.2.2 Metodologias para Medição do Desbalanceamento	19
2.3 Veículos Elétricos	20
2.3.1 Tipos de Veículos Elétricos	21
2.3.2 Sistemas de Carregamento.....	21
2.3.3 Modelos Utilizados nas Simulações.....	22
Capítulo 3 Metodologia Proposta	23
3.1 Introdução.....	23
3.2 Características do <i>Shopping Center</i>	23
3.3 Método de Análise de Desbalanceamento Causado por Carregamento Descoordenado de Veículos Elétricos	26
3.4 Método de Análise de Desbalanceamento Causado por Carregamento Coordenado de Veículos Elétricos.....	28
Capítulo 4 Resultados	31
4.1 Introdução.....	31
4.2 Simulações Considerando Dados de Quarta-Feira.....	32
4.2.1 Alocação Descoordenada de Veículos Elétricos.....	33
4.2.2 Alocação Coordenada de Veículos Elétricos	35
4.3 Simulações Considerando Sexta-Feira	37
4.3.1 Alocação Descoordenada de Veículos Elétricos.....	37
4.3.2 Alocação Coordenada de Veículos Elétricos	39
4.4 Simulações Considerando Sábado	40
4.4.1 Alocação Descoordenada de Veículos Elétricos.....	40
4.4.2 Alocação Coordenada de Veículos Elétricos	42
4.5 Simulações Considerando Domingo.....	43
4.5.1 Alocação Descoordenada de Veículos Elétricos.....	44
4.5.2 Alocação Coordenada de Veículos Elétricos	45
4.6 Comparação entre os Métodos	46
Capítulo 5 Conclusões.....	49
Referências Bibliográficas	51

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização

Em geral, problemas de desbalanceamento são causados por cargas monofásicas distribuídas de forma desigual entre as fases de um sistema elétrico. Isso pode levar a diversos prejuízos como avarias em equipamentos dotados de enrolamentos (motores, geradores, etc.), aquecimento e perdas de energia.

A relação desses problemas com os veículos elétricos ocorre quando se leva em consideração que o aumento do número de veículos elétricos nas ruas faz com que grandes estabelecimentos comerciais tendam a oferecer pontos de carregamento de veículos em seus estacionamentos de forma a proporcionar mais conforto aos seus clientes, como já acontece em alguns países desenvolvidos. Entretanto, a forma de carregamento da maioria dos veículos tende a ser monofásica. Assim, é esperado que um grande número de veículos elétricos sendo carregados de forma descoordenada, entre as fases deste estabelecimento, possa levar ao desbalanceamento do sistema e aos eventuais problemas citados acima.

1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é analisar como veículos elétricos podem contribuir para a solução de problemas de desbalanceamento em grandes consumidores de energia. Assim, ao invés de tratar os veículos elétricos como um problema para o sistema elétrico, este trabalho busca nos veículos elétricos um aliado na solução dos problemas de desbalanceamento de tensão.

Através de uma estimativa do fluxo diário de veículos em um *Shopping* da região da Zona da Mata mineira, serão realizadas simulações a fim de analisar o impacto dos veículos elétricos no balanceamento do *Shopping Center*. Assim, com o auxílio do software Matlab,

cenários de baixa e alta incidência de veículos elétricos serão analisados, considerando um modelo em que os veículos são carregados de forma descoordenada, e um modelo considerando que os veículos sejam carregados de forma coordenada. A simulação também leva em consideração quatro cenários diferentes da semana, de segunda a quinta feira, sexta feira, sábados e domingos feriados, de forma a adequar o problema aos diferentes padrões de consumo do *Shopping* estudado.

1.3 Revisão Bibliográfica

O desbalanceamento de tensão e correntes em sistemas de distribuição é um problema muito conhecido e debatido o setor elétrico. Entretanto, apenas nas últimas décadas o combate a estes problemas ganhou espaço, e soluções começaram a serem propostas. Segundo TEODORO (2005), as primeiras normas que visavam estabelecer limites máximos e mínimos de tensão em sistemas de média e baixa tensão datam do fim dos anos 1970 e início de 1980.

Em (TEODORO, 2005), o autor aborda o tema do desequilíbrio de tensões de maneira acadêmica, a partir da teoria das componentes simétricas. Na tese é demonstrado que o desequilíbrio ocorre quando a soma das componentes simétricas do sistema resulta em um valor diferente de zero, ponto a ser abordado mais adiante neste trabalho. Este problema é causado na maioria das vezes pela distribuição desigual de cargas monofásicas entre as fases deste sistema, o que faz com que a corrente em cada uma das fases seja diferente, levando a desequilíbrios de tensão que podem exceder o patamar de 5%. Desequilíbrios desta magnitude podem levar a problemas que vão desde o acionamento de sistemas de proteção até avaria na isolação de alguns equipamentos. O autor também aponta em seu trabalho os impactos negativos do desbalanceamento de tensão em cargas trifásicas: além de alimentarem o desequilíbrio do sistema, cargas deste tipo levam ao surgimento de correntes parasitas em motores. Isso pode danificar a máquina devido a modificações em suas propriedades térmicas, além de diminuir a eficiência da mesma.

Sendo assim, diversas alternativas têm sido propostas a fim de encontrar uma solução ou mesmo uma maneira de atenuar estes problemas. Em meio as alternativas presentes na literatura, destacam-se aquelas que propõem uma distribuição inteligente de cargas coordenadas entre as fases do sistema como forma de combater o desbalanceamento.

Uma destas propostas é o chaveamento do abastecimento de residências ligadas em um sistema de distribuição de baixa tensão (SHAHNIA et al., 2014). Neste trabalho os autores

medem o desbalanceamento do sistema através da corrente de neutro deste sistema e acompanham em tempo real a variação de carga entre as linhas por meio de dados colhidos através de medidores inteligentes. Com estes dados, é proposto um sistema de chaveamento que, a cada 15 minutos, verifica o balanceamento entre as fases e realiza a troca de residências da fase mais carregada para a fase menos carregada. Os resultados observados demonstram que o desbalanceamento de tensão do sistema em um período de 24 horas foi reduzido de uma média de 2,23% para 0,16%, sendo que o pico de desbalanceamento observado neste período foi de 0,77%.

Outros autores buscam a solução para o desbalanceamento propondo a utilização de cargas inteligentes no sistema. AKHTAR (2017) estudam como as *Smart Loads*, ou cargas inteligentes, podem auxiliar na mitigação de problemas de tensão causados por painéis fotovoltaicos e uma alta penetração de veículos elétricos. Cargas não críticas, são aquelas que conseguem operar suportando uma variação de tensão relativamente alta em seus terminais, como sistemas de refrigeração condicionada por exemplo. Além disso, estas cargas também são grandes responsáveis pelo problema de desbalanceamento nos sistemas de distribuição. Sendo assim, é proposta a conversão destas cargas em *Smart Loads* através da conexão em série de um compensador de tensão entre os terminais de alimentação e a carga. Este método busca auxiliar no balanceamento do sistema através da compensação ativa e reativa. O sistema demonstrou-se capaz de reduzir o desbalanceamento de tensão em sistemas de baixa tensão. Por outro lado, a alternativa ainda esbarra em alguns empecilhos como a dependência no número de cargas não críticas para a obtenção de melhores resultados, e também no custo de implementação dos conversores.

Ainda no âmbito das cargas inteligentes, outros pesquisadores focaram seus estudos na utilização de veículos elétricos para a redução de problemas de desbalanceamento.

Um exemplo se dá em (ESMAILI et al, 2015). Neste estudo, os pesquisadores propõem uma coordenação no carregamento de veículos elétricos através de uma otimização multiobjetivo a fim de reduzir problemas de desbalanceamento em uma rede de distribuição trifásica de baixa tensão, além de reduzir o valor da tarifa de energia para os consumidores. Assim, o modelo de otimização foi testado considerando uma rede de distribuição composta por 134 residências e 67 veículos elétricos, sendo 19 veículos conectados na fase “a”, 18 conectados a fase “b” e 30 veículos ligados na fase “c”. Além disso, também foram levados em consideração dados referentes às tarifas de energia e perdas no sistema. O proposto sistema mostrou-se efetivo em reduzir as perdas no sistema, o desbalanceamento de tensão e os custos.

Entretanto, o foco do trabalho é a definição do melhor momento para o carregamento dos veículos elétricos, ficando a distribuição dos mesmos entre as fases em segundo plano.

Já em GRAY et al. (2016a), é proposta uma reconfiguração de fases em sistemas de baixa tensão utilizando veículos elétricos. Essa reconfiguração ocorreria através da mudança de fase dos veículos elétricos durante seu carregamento de forma a reduzir o desbalanceamento do sistema, que tende a se elevar com o aumento no número de veículos elétricos. Assim, além de propor um método otimizado de carregamento de veículos elétricos, os autores também analisam o custo benefício da solução proposta ao comparar os custos gerados pelo desbalanceamento com o custo da implementação da solução.

A utilização de VEs como alternativa para a melhoria do balanceamento de fases em sistemas de distribuição de baixa tensão também é abordada em QUIRÓS-TORÓS et al. (2016). Neste caso, um algoritmo é proposto para o gerenciamento de carga dos veículos elétricos, visando controle e redução de problemas térmicos e de tensão. Por outro lado, a distribuição desigual de veículos elétricos entre as fases do sistema elétrico pode levar a problemas de desbalanceamento, como apontado em WECKX et al. (2015). Este desbalanceamento pode levar a um aumento significativo na corrente de neutro deste sistema. Uma solução proposta pelos autores é a utilização de veículos elétricos em conjunto com sistemas de geração fotovoltaicos como solução para o desbalanceamento entre as fases.

Na mesma linha de pesquisa, GRAY et al. (2016b) investiga o impacto do carregamento de veículos elétricos monofásicos no balanceamento de um sistema de distribuição de baixa tensão quando carregados em 120 V ou 240 V. Neste estudo, através de simulações de Monte Carlo, os autores demonstram que veículos carregados utilizando apenas uma fase (120 V), tendem a aumentar o desbalanceamento de sistema com mais frequência do que quando carregados entre duas fases (240 V).

Em seu trabalho, FARAHANI (2017) também estuda o papel dos veículos elétricos no aumento dos problemas de desbalanceamento de tensão em sistemas de distribuição de média tensão. Considerando um sistema composto por 134 residências localizadas na Europa, os autores mostram que em um cenário sem a presença de veículos elétricos, o desbalanceamento máximo de tensão era de 1.93%. Já em um cenário que considera o carregamento descoordenado de veículos elétricos o desbalanceamento máximo pode atingir valores de até 7.7%, enquanto que considerando um carregamento coordenado com taxas de carregamento variáveis este desbalanceamento pode ser reduzido para valores de 0.71%.

Alguns estudos buscam identificar os impactos dos veículos elétricos em sistemas de distribuição. NEAIMEH et al. (2015) combinam o perfil de carregamento de veículos elétricos

com dados obtidos de *Smart Meters* a fim de encontrar soluções para os possíveis problemas causados por esses veículos elétricos. Em UL-HAQ et al. (2015) são estudados dois perfis de carregamento de veículos elétricos, um descoordenado e um coordenado baseado no valor da tarifa de energia, mostrando que a configuração descoordenada pode levar a desbalanceamentos de tensão superiores a 2%. Em MOGHBEL (2015), os autores estudam o carregamento coordenado de veículos elétricos como alternativa para o controle de carga em transformadores, além de controle de tensão e corrente.

Seguindo linha similar de pesquisa, em SILVA et al. (2017), os autores buscam analisar como a oferta de pontos de carregamento de veículos elétricos em *Shopping Centers* poderia impactar positiva, ou negativamente o balanceamento de tensão destes estabelecimentos. Neste trabalho foi demonstrado que em ambos os casos a presença de veículos elétricos elevaria o desbalanceamento do *Shopping Center*. Entretanto, quando os veículos são carregados de forma descoordenada o nível de desbalanceamento encontrado foi tão alto que a corrente no neutro atingiu valores que poderiam até mesmo desarmar os sistemas de segurança do estabelecimento.

Sendo assim, tendo como referência os estudos citados anteriormente, com destaque para o artigo SILVA et al. (2017), este trabalho busca analisar como o perfil de tensão de *Shopping Centers* seria impactado pelo carregamento coordenado e descoordenado de veículos elétricos em seus estacionamentos.

Capítulo 2

Premissas Básicas e Conceitos Iniciais

2.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados conceitos importantes afim de auxiliar a compreensão das simulações e resultados apresentados ao fim deste trabalho. A apresentação destes conceitos se dará por meio de duas partes. Na primeira, será explicado o significado de desbalanceamento de tensão e suas consequências, e em seguida serão introduzidas metodologias para a medição do desbalanceamento de tensão. Já na segunda parte deste capítulo serão apresentadas informações sobre os tipos de veículos elétricos presentes no mercado atualmente, e suas características de carregamento. Por fim, a seção também apresentará o modelo hipotético de veículo utilizado nesta seção e configuração de carregamento mais adequada para o *Shopping* em estudo.

2.2 Desbalanceamento de Tensão

A definição de qualidade de energia, segundo GARCIA (2007) é um conjunto de fatores que avaliam se a tensão ou a corrente de um sistema está adequada a valores pré-estabelecidos. Dentre estes fatores destaca-se o desequilíbrio de tensão entre as fases de um sistema elétrico.

De acordo com EBERHARD (2011), desequilíbrio de tensão, ou desbalanceamento é caracterizado por diferenças na tensão de um sistema trifásico. Estas diferenças podem ser tanto

em relação à magnitude da tensão de cada uma das fases, ou mesmo defasagens diferentes de 120° entre elas. Estas discrepâncias ocorrem com mais frequência em sistemas de distribuição de baixa tensão. Segundo TEODORO (2005), o principal motivo destes desequilíbrios é a distribuição irregular de cargas monofásicas entre as fases deste sistema. Tal irregularidade induz as correntes nos condutores a apresentarem valores diferentes entre si, causando então quedas de tensão distintas em cada uma das fases do sistema elétrico, tornando o mesmo desequilibrado, o que pode gerar consequências negativas para o sistema.

2.2.1 Consequências do Desbalanceamento de Tensão

Uma das consequências do desbalanceamento de tensão pode ser apontada é o aumento na temperatura dos condutores, que pode levar a uma redução da potência útil fornecida e diminuição da vida útil de equipamentos como motores elétricos. Isso ocorre porque estas máquinas têm mais sensibilidade às correntes de sequência que surgem com o desbalanceamento de tensão. Aliado a isto, existe o fato de que a impedância de sequência negativa em motores elétricos é inferior à de sequência positiva, resultando em maiores correntes de sequência negativa e aumento no desbalanceamento (TEODORO, 2005).

Outra consequência proveniente do desequilíbrio de tensão é o aparecimento de correntes que fluem pelo condutor neutro de sistemas trifásicos de quatro fios. A corrente que flui pelo condutor neutro é definida como a soma fasorial das correntes das três fases do sistema, como pode ser observado pela equação (1). Assim, em um sistema cujas correntes possuam magnitudes iguais e separação angular de 120° , esta corrente é nula. Entretanto, caso o sistema esteja desbalanceado, esta corrente apresenta valores superiores à zero, e quanto maior o desequilíbrio, maior a corrente do condutor neutro. Logo, a corrente de neutro pode ser considerada um parâmetro que reflete o desbalanceamento de um sistema elétrico trifásico (DEY et al., 2013).

$$\vec{I}_n = \vec{I}_a + \vec{I}_b + \vec{I}_c \quad (1)$$

Onde:

\vec{I}_n : corrente de neutro;

\vec{I}_a : corrente da fase A;

\vec{I}_b : corrente da fase B;

\vec{I}_c : corrente da fase C.

2.2.2 Metodologias para Medição do Desbalanceamento

Nesta seção serão apresentados os três principais métodos utilizados atualmente para a medição do desequilíbrio de tensão. O método NEMA e o método IEEE buscam quantificar o desbalanceamento trabalhando apenas com os módulos das tensões, enquanto o método CIGRÉ correlaciona as tensões fase-fase por meio de uma grandeza adimensional.

Na primeira metodologia desenvolvida pela NEMA, o desequilíbrio de tensão do sistema é dado pela razão entre o máximo desvio das tensões em relação à média, e a média aritmética dos módulos das tensões trifásicas. Ou seja, sem considerar a separação angular entre estas tensões (TEODORO, 2005). A equação desta metodologia é apresentada pela equação (2).

$$U_{\text{NEMA}} = \frac{\Delta V_{\text{máx}}}{\Delta V_{\text{méd}}} * 100 \quad (2)$$

Onde:

U_{NEMA} : Desbalanceamento;

$\Delta V_{\text{máx}}$: Desvio máximo de tensão em relação a $V_{\text{méd}}$;

$\Delta V_{\text{méd}}$: Média aritmética das tensões trifásicas.

No método IEEE, o cálculo do desbalanceamento leva em consideração dois fatores, máximo desvio entre as tensões do sistema e o somatório destas tensões (SHAHNIA et al., 2014). Esta medição é realizada através da equação (3).

$$U_{\text{IEEE}} = \frac{3 * (V_{\text{máx}} - V_{\text{min}})}{V_{\text{a}} + V_{\text{b}} + V_{\text{c}}} * 100 \quad (3)$$

Onde:

U_{IEEE} : Desbalanceamento;

$V_{\text{máx}}$: Tensão máxima medida;

V_{min} : Tensão mínima medida;

V_{a} : Tensão na fase A;

V_{b} : Tensão na fase B;

V_{c} : Tensão na fase C.

Já a metodologia utilizada pela CIGRÉ obtém uma grandeza adimensional δ através de manipulações algébricas utilizando os módulos das tensões fase-fase do sistema trifásico (GARCIA, 2007). Assim, o desbalanceamento é então calculado de acordo com as equações (4) e (5).

$$U_{\text{Cigré}} = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6 * \delta}}{1 + \sqrt{3 - 6 * \delta}}} * 100 \quad (4)$$

$$\delta = \frac{|V_{ab}|^4 + |V_{bc}|^4 + |V_{ac}|^4}{(|V_{ab}|^2 + |V_{bc}|^2 + |V_{ac}|^2)^2} \quad (5)$$

Onde:

$U_{\text{Cigré}}$: Desbalanceamento;

V_{ab} : Tensão entre as fases A e B;

V_{bc} : Tensão entre as fases B e C;

V_{ca} : Tensão entre as fases C e A.

Neste trabalho, não foram utilizados nenhum dos métodos citados anteriormente para a medição do desequilíbrio de tensão, uma vez que os três métodos dependem da queda de tensão em cada uma das fases do sistema. Esta queda de tensão depende, entre outros fatores de características dos cabos que integram o sistema de distribuição do *Shopping Center*, e estes dados não foram disponibilizados para a realização deste trabalho. Assim, para estimar o desbalanceamento, foi utilizada a metodologia apresentada na seção 2.2.1, onde é demonstrado que o desequilíbrio entre as fases de um sistema elétrico trifásico pode ser estimado através da magnitude da corrente do condutor neutro.

2.3 Veículos Elétricos

Nesta seção serão apresentadas características dos três tipos de veículos elétricos existentes atualmente no mercado, além de comparar as diferentes formas de carregamento de cada um destes veículos.

2.3.1 Tipos de Veículos Elétricos

Assim como exposto por BUNGA (2013), o que caracteriza um veículo elétrico é a presença de componentes como um motor elétrico, uma bateria e um equipamento de carregamento. Entretanto, os veículos elétricos podem ser divididos em três tipos, *Battery Electric Vehicles* (BEV), *Plug-in Hybrid Electric Vehicles* (PHEV) e *Extended-Range Electric Vehicles* (EREV). A diferenciação entre estes três tipos é dependente da estrutura interna e de como os componentes principais destes veículos se organizam.

A principal característica dos BEVs, é que este tipo de EV não possui mecanismos de combustão interna, ou seja, são veículos puramente elétricos. Segundo BUNGA (2013) este tipo de veículo é capaz de percorrer distancias maiores, cerca de 100 a 160 Km, e possui baterias com maior capacidade, em torno de 25 e 35 kWh. De acordo com IEA (2016), este é o tipo de veículo elétrico que mais recebe incentivos governamentais para sua comercialização. Uma desvantagem dos BEVs é o fato destes veículos serem completamente dependentes das baterias, considerando a baixa presença de postos de carregamento de veículos elétricos (BUNGA, 2013).

O PHEVs, diferentemente dos BEVs, são veículos que além do motor elétrico, também possuem um sistema de combustão interna e conseguem recarregar suas baterias por meio de fontes externas (BUNGA, 2013). Apesar de percorrer distâncias inferiores se comparado ao BEV, os PHEVs utilizam seu sistema de combustão interna para estender a capacidade do veículo e percorrer distâncias adicionais. Este tipo de veículo elétrico também apresenta preços inferiores se comparado aos modelos puramente elétricos.

O terceiro tipo de veículos elétricos são os EREVs, que são um tipo de PHEVs e também apresentam um sistema de combustão interna (BUNGA, 2013). O grande diferencial deste tipo de veículo é que o sistema de combustão interna é utilizado para gerar eletricidade através de um pequeno gerador a combustão, ampliando assim a distância percorrida pelo veículo, além daquela suportada pelas baterias.

2.3.2 Sistemas de Carregamento

Por possuírem uma carga relativamente alta, veículos elétricos necessitam de pontos de carregamento destinados exclusivamente para este fim. Assim, a *Society of Automotive Engineers* (SAE), considera três padrões de carregadores de veículos com diferentes

configurações elétricas. Estes carregadores são classificados de acordo com a nomenclatura a seguir; AC level 1, AC level 2 e AC level 3 (BUNGA, 2013).

Os carregadores do tipo AC Level 1, são utilizados em sistemas de baixa tensão com alimentação de 120V, 16 A e monofásicos. Este modelo é mais utilizado em residências e a capacidade deste modelo é de cerca de 2 kW de demanda (BUNGA, 2013). Segundo CHANG et al. (2012), um veículo elétrico padrão do mercado com uma bateria de 24 kWh levaria em torno de 8 a 14h para ser totalmente carregada.

Já os sistemas de carregamento do tipo AC Level 2, são alimentados a 240V monofásicos e suportam cargas de até 15 kW de demanda e 80 A. Este tipo de carregador é mais comum em estabelecimentos comerciais. Um veículo elétrico padrão do mercado com taxa de carregamento de 6.6 kWh, conseguiria ser totalmente carregado em um intervalo de 3 a 5 horas.

Por fim, os carregadores do tipo AC Level 3, conhecidos como *Fast Chargers*, são trifásicos e operam com tensão nominal que varia de 208 a 600V e ele suporta uma demanda de até 96 kW. O tempo de carregamento neste tipo de modelo pode ser de 10 a 15 minutos (BUNGA, 2013). A grande desvantagem dos carregadores AC Level 3 é o alto custo dos equipamentos, o que muitas vezes inviabiliza sua implementação em larga escala (CHANG et al., 2012).

2.3.3 Modelos Utilizados nas Simulações

Após analisar os modelos de carregadores disponíveis, o AC level 2 foi definido como carregador mais provável a ser implementado pelo *Shopping Center*, sendo então utilizado na simulação. A escolha pelo modelo AC level 2 é justificada pelo fato deste carregador ser o mais comum entre estabelecimentos comerciais e pelo custo benefício quando comparado com os outros modelos, tanto com relação ao tempo de carga, quanto ao custo da implantação do carregador.

Além disso, considerando os modelos de veículos elétricos existentes, foi definido um veículo elétrico médio, com taxa de carregamento de 6,6 kWh como padrão para a simulação.

Capítulo 3

Metodologia Proposta

3.1 Introdução

Neste capítulo será apresentada a metodologia desenvolvida para analisar o impacto de veículos elétricos em sistemas elétricos de baixa e média tensão. Inicialmente será apresentado algumas características do *Shopping Center* escolhido para a implementação da metodologia. Em seguida, os algoritmos de alocação serão introduzidos de acordo com sua complexidade. A metodologia de alocação descoordenada de veículos será apresentada inicialmente, dado que é a mais simples em relação à alocação coordenada de veículos. Logo, o algoritmo de alocação de veículos será apresentado, uma comparação será realizada entre ambos. Por fim, neste capítulo são apresentadas as simulações realizadas e seus procedimentos.

3.2 Características do *Shopping Center*

Para analisar o impacto do carregamento descoordenado de veículos elétricos em sistemas de média e baixa tensão, foi escolhido um *Shopping Center* na região da Zona da Mata Mineira como modelo para realização das simulações. A escolha do local de simulação levou em consideração fatores como a carga demandada pelo estabelecimento, o fluxo diário de pessoas e veículos e, por fim, a possibilidade da implantação de carregadores para veículos elétricos em seus estacionamentos. Os dados referentes à tensão, corrente e carga do *Shopping Center* foram fornecidos.

Este é um estabelecimento comercial de grande porte, com alimentação de 13,8 kV. Esta tensão é posteriormente reduzida e distribuída no estabelecimento de acordo com cada necessidade de utilização, sendo que uma destas utilizações seria para a alimentação de postos de carregamento de veículos elétricos. A Figura 1 representa a curva de carga mensal deste estabelecimento. Esta carga será impactada pela presença dos veículos elétricos no *Shopping Center*, dado que cada veículo representa uma carga adicional de 6,6 kW. Entretanto, devido ao fato dos postos de carregamento serem do tipo AC Level 2, ou seja, monofásicos, a penetração dos veículos elétricos pode ocorrer de maneira desigual entre as fases do sistema, levando ao desbalanceamento.

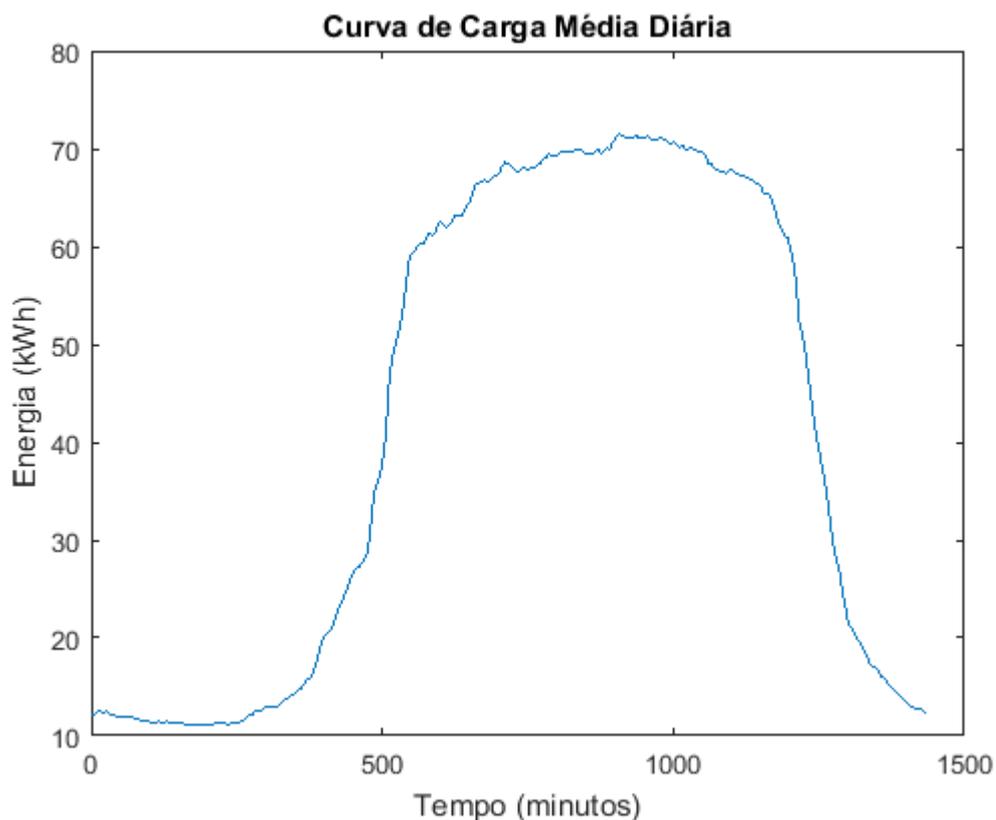


Figura 1. Curva de Carga

Assim, a fim de mensurar o impacto destes veículos elétricos no desbalanceamento do sistema, foi necessário estimar a quantidade de veículos que circulam no *Shopping Center* por dia. Segundo o estudo realizado pela Secretaria de Trânsito de São Paulo (PEREIRA, 2011), é possível estimar o fluxo diário de veículos em um determinado *Shopping Center* a partir de dados como a área bruta locável do *Shopping*, o dia da semana e a localização do estabelecimento. O fluxo viário em *Shoppings Centers* apresenta quatro padrões referentes a diferentes dias da semana: de segunda a quinta feira, sexta feira, sábado e domingo

(CÁRDENAS, 2003). Os dados sobre fluxo horário de veículos em cada um destes dias, em função do fluxo viário total diário deste centro comercial é definido de acordo com a metodologia proposta por PEREIRA (2011).

Assim, utilizando os dados fornecidos pelo *Shopping* e as metodologias propostas em por PEREIRA (2011) e CÁRDENAS (2003) foi estimado o fluxo horário de veículos que circula por este centro comercial em quatro dias diferentes. Os resultados podem ser conferidos na Figura 2.

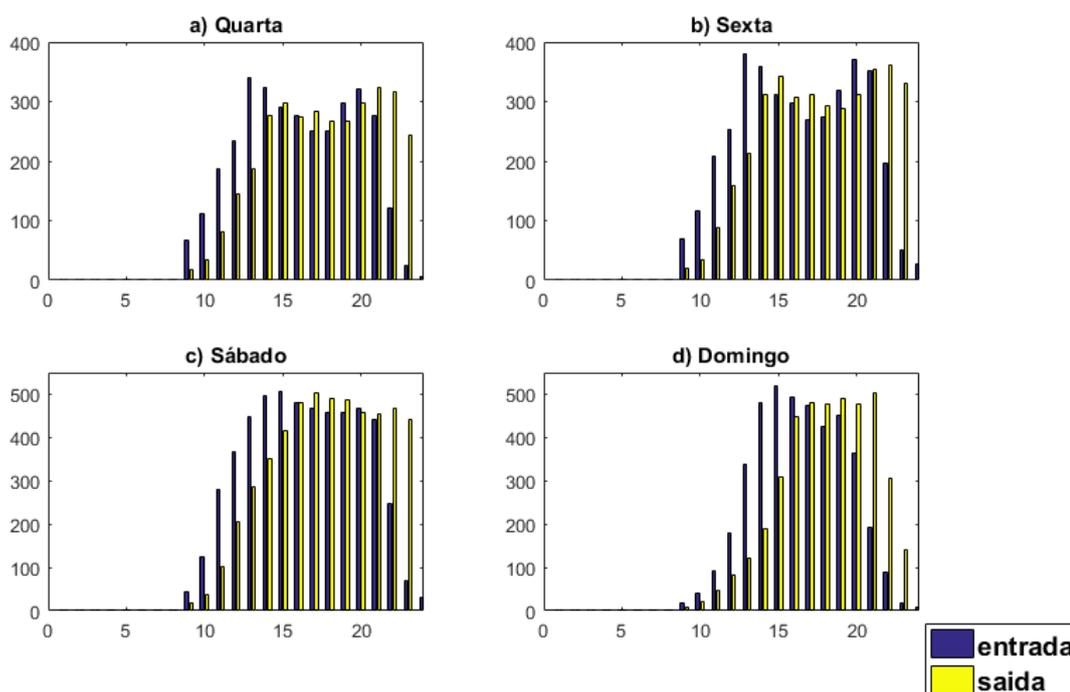


Figura 2. Fluxo de horário de veículos por dia

Observa-se que os picos do gráfico de fluxo de veículo coincidem com os momentos de carga mais alta do *Shopping Center*.

Após estimar o fluxo diário de veículos no *Shopping Center* nas quatro situações diferentes, foi realizada uma estimativa para determinar o percentual do fluxo total de veículos que deveria ser composto por veículos elétricos.

Neste estudo foram definidas duas situações, a primeira, considerando que 10% da frota total de veículos elétricos seja composta por veículos elétricos e uma segunda situação, na qual 40% do número total de veículos serão veículos elétricos.

Estes números baseiam-se nas estimativas realizadas por EPRI (2007) para os próximos 50 anos nos EUA. Segundo o autor, espera-se uma penetração de 20 a 80% de

veículos elétricos nos EUA até meados do século XXI. Assim, dadas as diferenças econômicas entre os dois países, foi realizada uma estimativa mais conservadora para o Brasil, dividindo os valores propostos por dois.

De acordo com os dados fornecidos pela equipe do *Shopping Center* estudado, este estabelecimento possui cerca de 2000 vagas de estacionamento. Considerando os percentuais definidos anteriormente, este shopping então deveria reservar entre 10% e 40% de suas vagas para postos de carregamento. Entretanto, como pode ser observado na Figura 2, o fluxo total de veículos por hora dentro do *Shopping Center* raramente atinge valores superiores a 50%. Assim, foi definido que o número de vagas oferecidas para veículos elétricos seria igual a 10% do número total de vagas do *Shopping Center*.

Para a implementação da metodologia proposta no estabelecimento real, propõe-se que a indicação das vagas aos motoristas será realizada por meio de um painel eletrônico nas estradas do estacionamento.

3.3 Método de Análise de Desbalanceamento Causado por Carregamento Descoordenado de Veículos Elétricos

Primeiramente foi proposto um algoritmo que recebe como dados de entrada o número de veículos que chegam ao *Shopping Center* a cada 15 minutos e aloca estes veículos de maneira aleatória entre os postos de carregamento livres do estacionamento, sem considerar a fase na qual este posto de carregamento está conectado. A única restrição deste modelo é o número de vagas livres em cada fase, naquele intervalo de tempo, ou seja, os veículos elétricos que entrarem no *Shopping Center* podem estacionar livremente. A saída do algoritmo é o número de vagas livres para o próximo intervalo de tempo e o nível de desbalanceamento do sistema, causado pelo desequilíbrio de carga entre as fases do sistema.

Os dados de entrada de cada ciclo são o número de veículos que entrou e saiu de cada fase durante o ciclo anterior, o número de veículos que permaneceu no *Shopping* e os dados da curva de carga do estabelecimento. Isso significa que, no início de cada ciclo, o algoritmo irá gerar um número aleatório de veículos que devem entrar no estacionamento e um número aleatório de veículos elétricos que serão desconectados de cada fase do *Shopping Center*. Estes valores servirão como dados de entrada para o próximo ciclo do algoritmo.

O fluxograma apresentado na Figura 3 mostra o funcionamento do algoritmo realizado para a simulação da alocação de veículos elétricos de maneira descoordenada. As simulações foram realizadas com o auxílio do software Matlab.

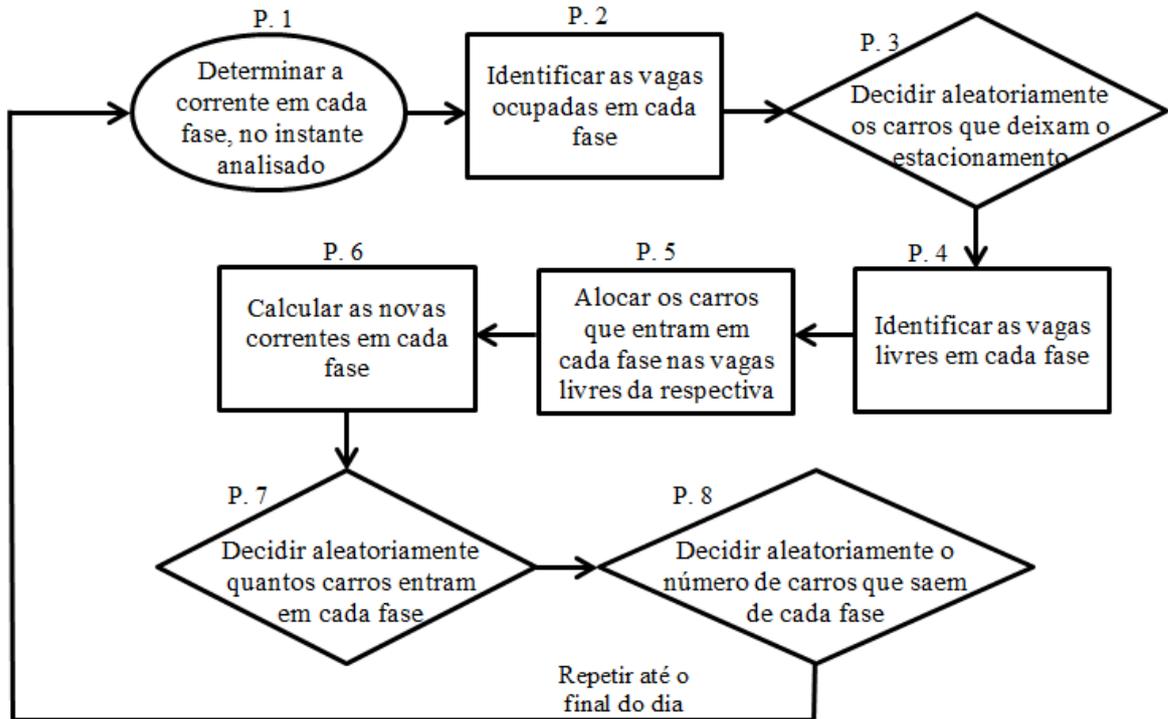


Figura 3. Fluxograma da Metodologia de carregamento descoordenado

No primeiro passo, representado pela letra P1, ocorre a análise dos dados de corrente do centro comercial a cada intervalo de 15 minutos, considerando sua curva de carga e o número de veículos que estavam presentes no *Shopping* ao fim do ciclo anterior.

Já no passo P2, o algoritmo verifica o número de vagas que estão ocupadas naquele instante em cada uma das fases. Em seguida, no passo P3, o algoritmo decide aleatoriamente as posições dos veículos que deve deixar o *Shopping* em cada fase levando em consideração o número de veículos elétricos que deve deixar cada fase, definido no passo P.8 do ciclo anterior.

No passo P.4, o algoritmo, identifica as posições de vagas livres conectadas a cada uma das fases do *Shopping Center*. No passo P5, os veículos que entram de forma aleatória em cada uma das fases são alocados nas posições livres identificadas no passo P4.

No passo P6, a corrente de cada fase é calculada novamente, levando em consideração o novo número de veículos elétricos conectados em cada uma destas fases. A seguir, utilizando as correntes de cada fase, a nova corrente do neutro para aquele instante é calculado de acordo com a equação (1).

No passo P.7, tendo como base o número de veículos presente no *Shopping* neste instante, o algoritmo define um número aleatório de veículos elétricos que devem entrar em cada uma das fases do sistema para o próximo ciclo.

Por fim, no passo P8, o número de veículos que deverá deixar cada fase no próximo intervalo de 15 minutos é determinado.

Vale ressaltar que a soma do número de veículos elétricos que entram em cada uma das fases deve ser igual à entrada total de veículos elétricos no *Shopping Center* para o ciclo determinado, originada da estimativa do fluxo de veículos. O mesmo acontece com a soma de carros que saem do *Shopping Center*.

Esse algoritmo é repetido em intervalos de 15 minutos, até o fim do dia, somando, assim, 96 iterações.

3.4 Método de Análise de Desbalanceamento Causado por Carregamento Coordenado de Veículos Elétricos

A seguir será descrito o algoritmo que simula uma alocação coordenada de veículos elétricos entre as fases do *Shopping Center*, de maneira a reduzir os impactos causados pela alocação descoordenada de veículos elétricos entre as fases deste estabelecimento.

Assim como no algoritmo de carregamento descoordenado, os dados de entrada de cada ciclo são o número aleatório de veículos que deixou cada fase durante o ciclo anterior, o número de veículos que permaneceu no *Shopping* e a curva de carga do estabelecimento. A grande diferença para o algoritmo anterior, é que os veículos que chegam ao *Shopping Center*, a cada ciclo, são alocados individualmente na fase de menor corrente do sistema, de maneira a balancear a carga em cada uma das fases.

O fluxograma apresentado na figura 4 demonstra o funcionamento do algoritmo realizado para a simulação da alocação de veículos elétricos de maneira coordenada. As simulações também foram realizadas com o auxílio do software Matlab.

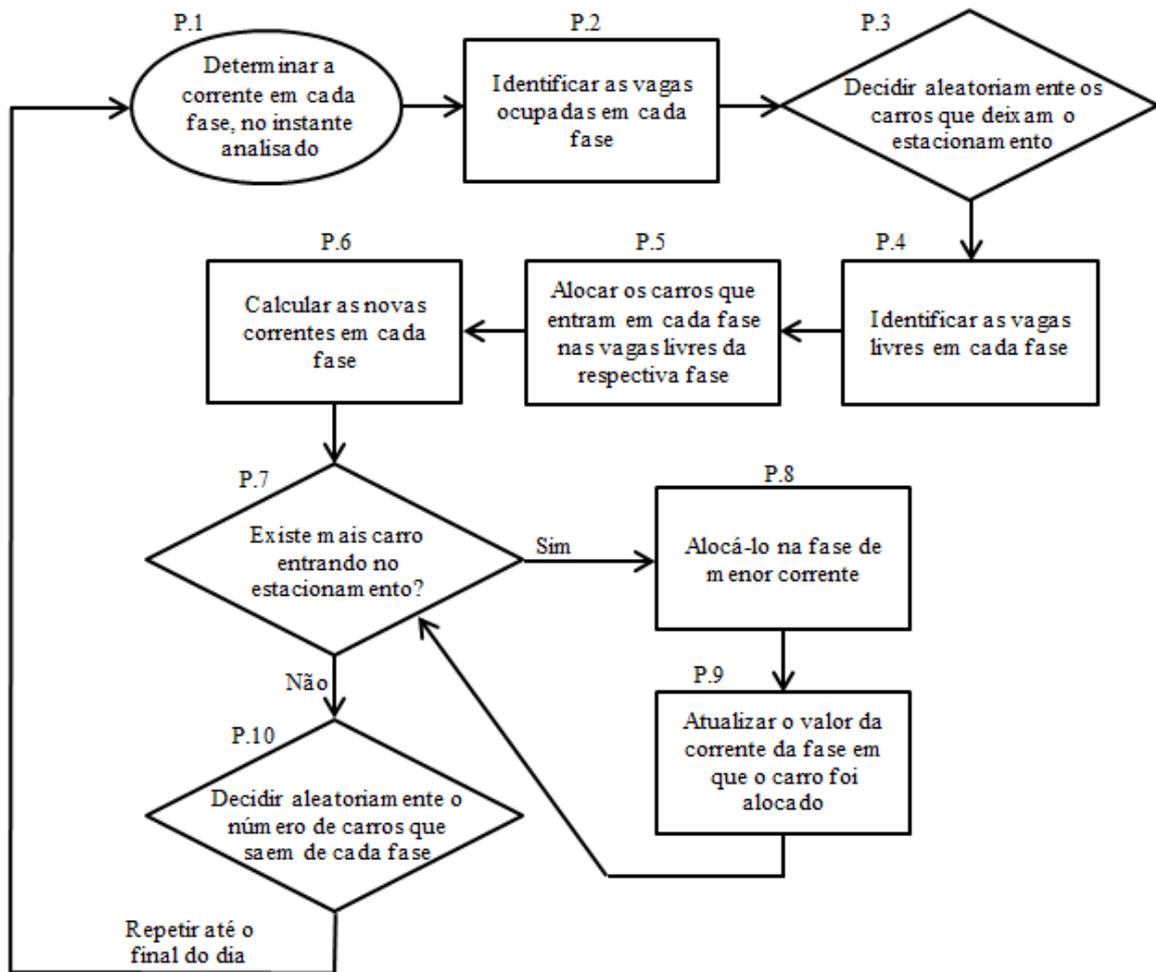


Figura 4. Fluxograma da metodologia de carregamento coordenado

Similarmente ao método apresentado na Seção 3.3, as acorrentes de cada uma das fases do estabelecimento em questão são calculadas a cada 15 minutos na etapa P1. Em seguida, a corrente do neutro é encontrada através da equação (1), sem considerar a presença de veículos elétricos.

Em seguida, no passo P2, a posição dos veículos que estão carregando em cada uma das fases é identificada. Conhecendo as posições ocupadas por veículos elétricos em cada fase, são definidas de forma aleatória quais posições deverão ser desocupadas, ou seja, definem-se de maneira aleatória os veículos que deixam cada posição no passo P3, tendo como base o número de veículos que deixa cada fase, definido no passo P10 do ciclo anterior.

A seguir, o algoritmo identifica as vagas livres em cada uma das fases, para que no próximo passo, P5, os veículos que chegam ao *Shopping* de maneira aleatória sejam alocados de maneira organizada nestas posições. O número de veículos que deve entrar em cada fase é definido pelo *loop* representado pelos passos P7 P8 e P9, que alocam os veículos individualmente em cada fase buscando equilibrar a carga entre as mesmas.

Na etapa P6, a corrente de cada uma das fases é então calculada levando em consideração o novo número de veículos presente em cada fase, e em seguida a nova corrente do neutro é encontrada de acordo com a equação (1).

Os passos P.7, P.8 e P.9 são realizados para cada veículo elétrico que entrará no estacionamento do *Shopping Center* nos próximos 15 minutos. P.7 analisa se ainda existe algum carro ainda não alocado para conectar à respectiva fase de carregamento. P.8 aloca o mesmo na fase de menor corrente e P.9 atualiza a corrente dessa fase, somando a corrente de carregamento do veículo à corrente já existente.

Em P.10, são decididos, aleatoriamente, quantos veículos elétricos saem de cada fase. Contudo, a soma de veículos elétricos que saem de cada fase deve ser igual à saída total de veículos do *Shopping Center*.

Assim como o algoritmo sem coordenação, esse procedimento é repetido em intervalos de 15 minutos, até o fim do dia, somando, assim, 96 iterações.

É interessante revelar que esse método pode ser aplicado na prática, sem a necessidade de grandes investimentos. Como o *Shopping Center* já possui equipamentos que medem as correntes de fase de 5 em 5 minutos, só seria necessário um equipamento que indicasse a fase que o veículo elétrico deve se conectar, como, por exemplo, um painel eletrônico ou luzes de cores diferentes, como vermelho e verde, indicando a disponibilidade de recarga.

Capítulo 4

Resultados

4.1 Introdução

A fim de realizar uma análise precisa, de como o carregamento de veículos elétricos impactariam no balanceamento das fases do *Shopping Center* analisado, foram realizadas quatro simulações para cada tipo de configuração de carregamento, descoordenado e coordenado. Em ambos os casos, foi considerada a diferença no fluxo de veículos do *Shopping Center* para diferentes dias da semana, realizando-se assim, simulações para a quarta feira, que apresenta característica de fluxo viário semelhante aos dias de segunda a quinta; sextas feira; sábado; e domingo. Além disso, cada simulação considerou dois cenários, um mais conservador, que considera uma presença média de 10% de veículos elétricos entre a frota total de veículos que circula no *Shopping* em um dia, e outro cenário mais robusto, onde considera-se que 40% do fluxo de veículos é composto por veículos elétricos.

A Tabela 1 sintetiza os cenários e situações consideradas em cada simulação. Os resultados para cada simulação serão apresentados nos tópicos seguintes, e comparados ao final deste capítulo.

Tabela 1. Simulações realizadas

Dia da Semana	Carregamento	Penetração de veículos elétricos
Quarta	Descoordenado	10%
		40%
	Coordenado	10%
		40%
Sexta	Descoordenado	10%
		40%
	Coordenado	10%
		40%
Sábado	Descoordenado	10%
		40%
	Coordenado	10%
		40%
Domingo	Descoordenado	10%
		40%
	Coordenado	10%
		40%

4.2 Simulações Considerando Dados de Quarta-Feira

As primeiras simulações foram realizadas considerando os dados de carga de uma quarta-feira. O dia foi escolhido para representar o número de veículos elétricos que circulam no *Shopping Center* entre segunda-feira e quinta-feira, dado que as características de fluxo viário para estes dias são semelhantes (PEREIRA, 2011).

Inicialmente realizou-se a simulação desconsiderando a presença de veículos elétricos, a fim de observar o desbalanceamento natural do *Shopping Center*. O resultado desta simulação é apresentado na Figura 5.

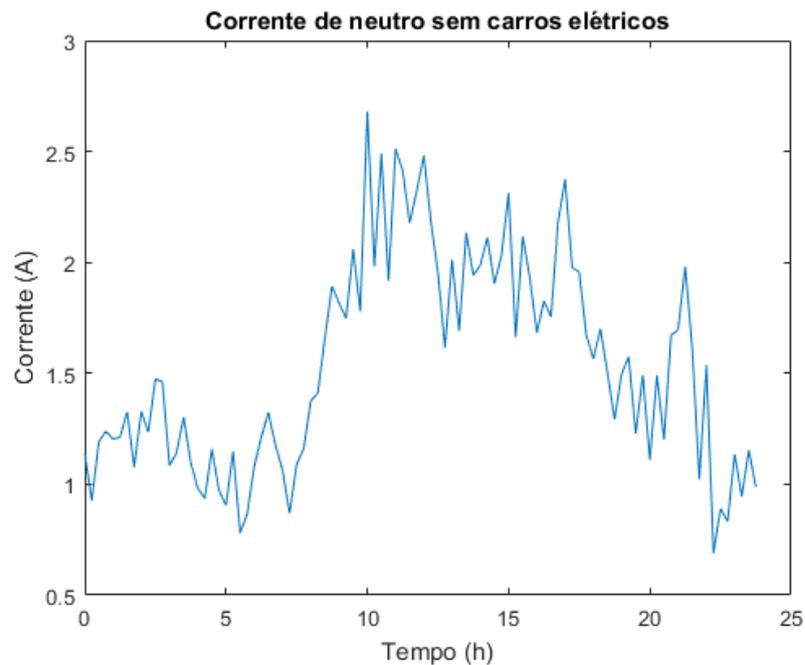


Figura 5. Desbalanceamento natural do *Shopping Center* em uma quarta-feira

A Figura 5 representa a corrente do condutor neutro deste estabelecimento ao longo do dia. Como sistemas trifásicos balanceados possuem corrente de neutro igual à zero, a corrente da Figura 5 representa o desbalanceamento natural do *Shopping Center*. Logo, a mesma será utilizada como referência para medir o desbalanceamento causado pelos veículos elétricos neste estabelecimento. Isso quer dizer, que caso a presença de veículos elétricos faça com que a corrente aumente, isso implica em aumento no desbalanceamento, e caso a corrente seja reduzida devido a organização dos veículos elétricos, isso implica em uma redução no desbalanceamento do sistema.

Assim, os tópicos a seguir apresentam os resultados obtidos para esta simulação considerando as duas configurações de carregamento e os diferentes percentuais de veículos elétricos utilizados neste estudo.

4.2.1 Alocação Descoordenada de Veículos Elétricos

Os resultados obtidos para a simulação de uma quarta-feira, considerando a presença de veículos elétricos, configuração de carregamento descoordenado entre as fases deste sistema é mostrado na Figura 6.

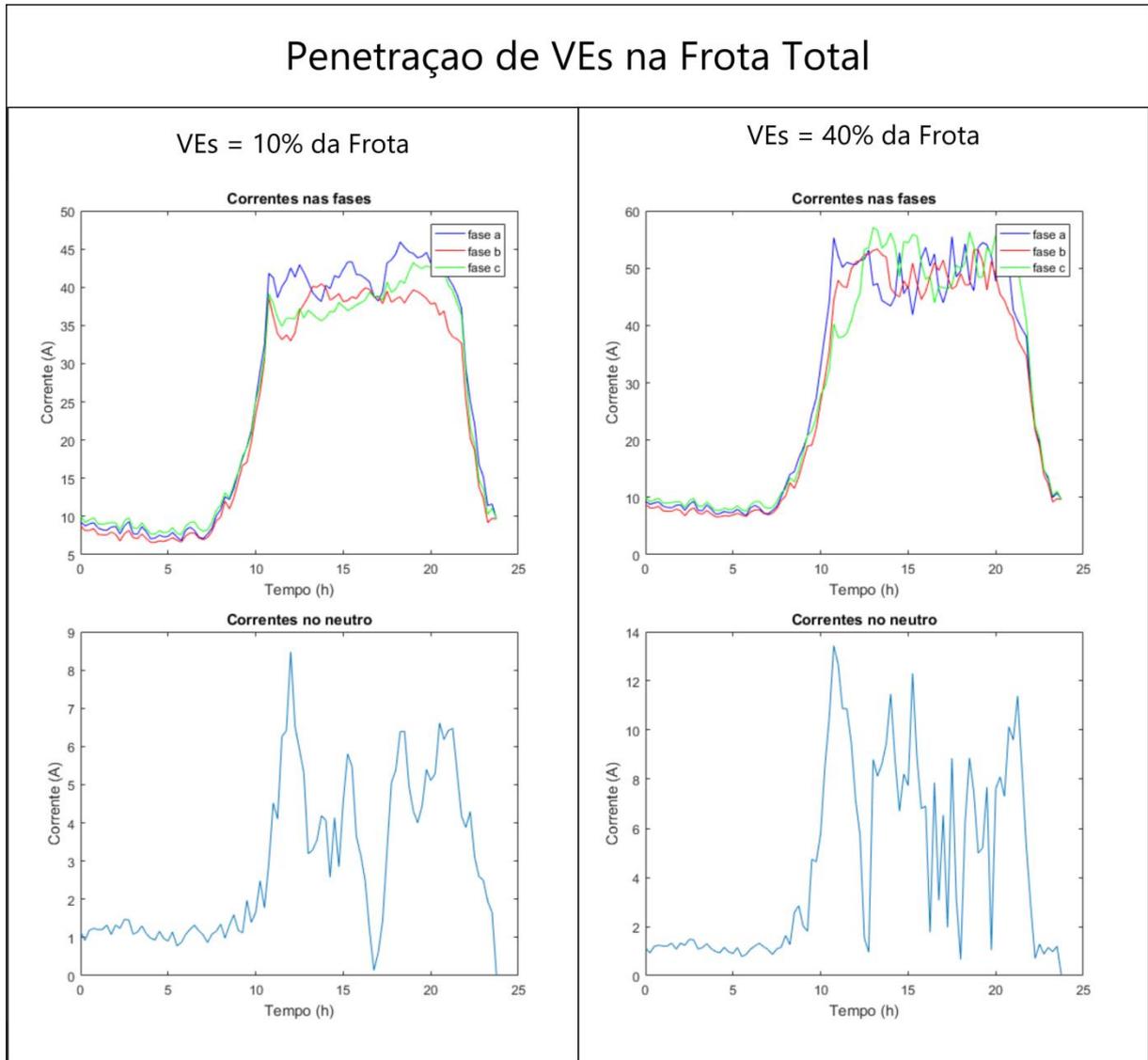


Figura 6. Resultados das simulações para quarta-feira com carregamento descoordenado

Os gráficos superiores representam a corrente nas três fases do *Shopping Center* ao longo do dia, ao passo que os gráficos inferiores representam a corrente do neutro gerada pelo desequilíbrio entre as fases deste sistema. Os gráficos do lado esquerdo apresentam os resultados para simulação que considera uma penetração de 10% de veículos elétricos, enquanto que os gráficos no canto direito simulam o comportamento do sistema para uma penetração de 40% de veículos elétricos.

Ao observar as correntes de fase no primeiro caso, com 10% de penetração de veículos elétricos, nota-se um pequeno desequilíbrio, que aumenta de forma perceptível no período de pico de consumo do *Shopping Center*. O período onde o desequilíbrio entre as correntes apresenta maior valor coincide com o período de maior fluxo de veículos no *Shopping Center*, indicando, que a presença destes carros levaria a um acréscimo no desbalanceamento. Este

acréscimo é evidenciado pelo período no qual a corrente do neutro apresenta seus valores mais elevados. Em comparação com a Figura 5 é possível perceber que no horário de pico de consumo, a corrente do condutor neutro passou de valores em torno de 2 A para valores de até 8 A. Vale ressaltar que a volatilidade da curva aumentou, ou seja, o valor da corrente do neutro apresenta mais oscilação em relação aos seus valores máximo e mínimo. Esse comportamento é decorrente da entrada e saída aleatória de veículos do sistema que, devido a sua carga elevada, acabam por causar oscilações nas correntes das fases e do neutro.

Com relação à simulação que considera uma presença de 40% de veículos elétricos, nota-se claramente que o aumento na frota de veículos elétricos impactou no aumento de carga no *Shopping Center*. Isso refletiu na corrente do neutro, que apresentou picos próximos a 14 A, ou seja, cerca de 6 vezes superior a uma situação sem veículos elétricos. Com relação a uma penetração maior de veículos elétricos, o aumento observado pode ser explicado pelo aumento de carga, representado pelo número maior de carros elétricos no estabelecimento.

4.2.2 Alocação Coordenada de Veículos Elétricos

A Figura 7 apresenta os resultados referentes à segunda simulação realizada na quarta feira, neste caso, considerando uma alocação coordenada de veículos elétricos utilizando o algoritmo proposto na Seção 3.4.

Observando os resultados referentes uma penetração de 10%, nota-se que a coordenação de carregamento dos veículos elétricos ajudou a reduzir o desbalanceamento em relação ao sistema descoordenado. Este fato fica evidente tanto no gráfico superior que representa a corrente entre as fases do sistema, quanto no gráfico inferior, que mostra a corrente do neutro. O desbalanceamento, nesse caso, se manteve em patamares similares ao sistema sem veículos elétricos.

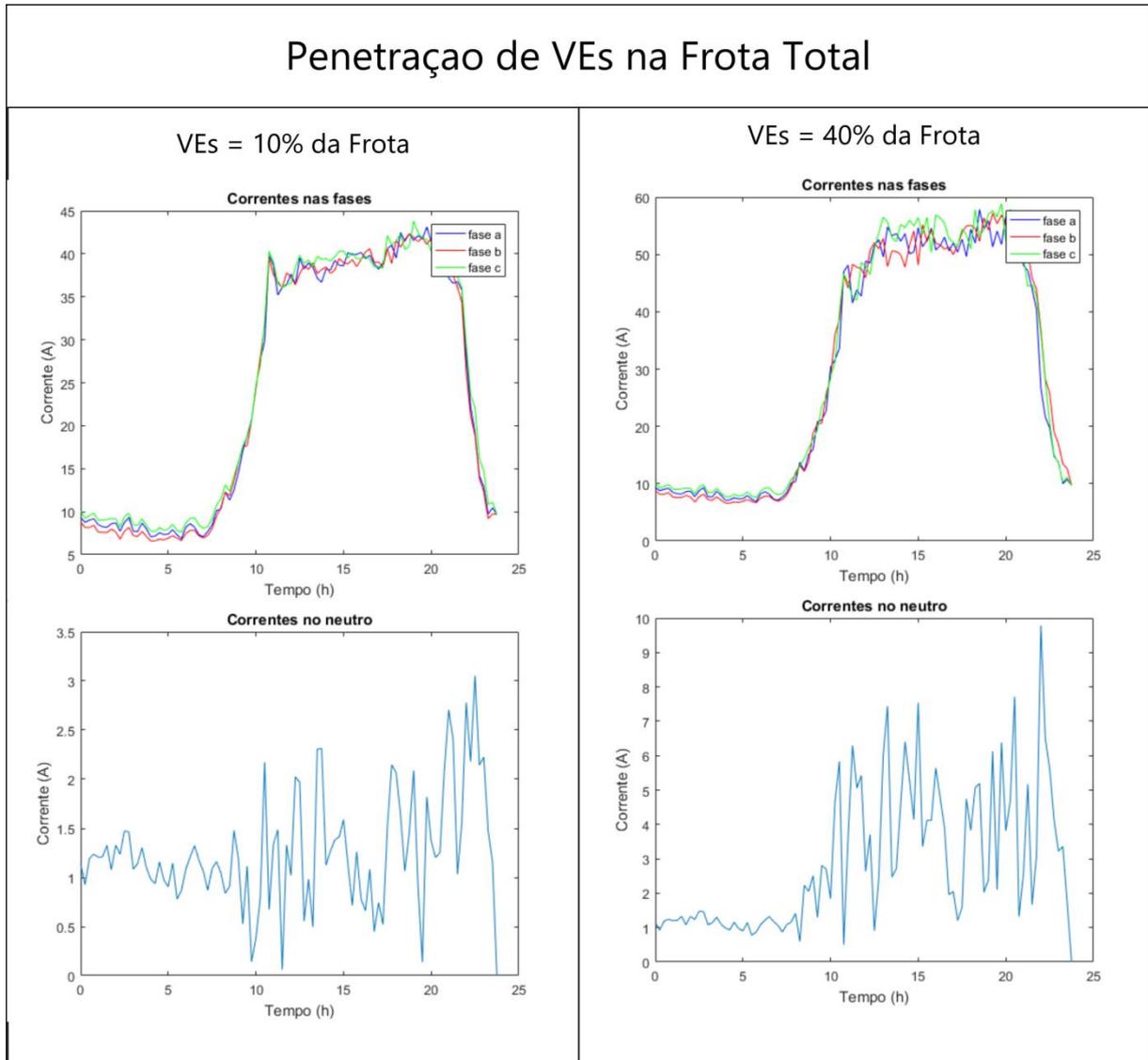


Figura 7. Resultados das simulações para quarta-feira com carregamento coordenado

Já a simulação com 40% de veículos elétricos também apresentou valores menores se comparada à configuração descoordenada. Entretanto, quando comparado ao sistema sem a presença de veículos elétricos, nota-se que o desbalanceamento aumentou. Tanto as curvas de corrente em cada uma das fases, quanto a curva que representa a corrente pelo condutor neutro apresentaram valores mais elevados e oscilações mais acentuadas. Este comportamento se dá pelo aumento de carga gerado pela presença maior de veículos elétricos, o que eleva os níveis de corrente. Além disso, embora a entrada de carros seja controlada, a saída ainda permanece aleatória, dado que não é possível controlar o momento de saída dos clientes do estabelecimento comercial. Assim, blocos maiores de cargas saindo do sistema de forma aleatória influenciam no aumento do desequilíbrio neste caso.

4.3 Simulações Considerando Sexta-Feira

De forma semelhante ao anterior, foi realizada uma simulação desconsiderando a presença de veículos elétricos, a fim de obter a corrente natural do condutor neutro deste *Shopping* para a sexta-feira. A curva é representada pela Figura 8.

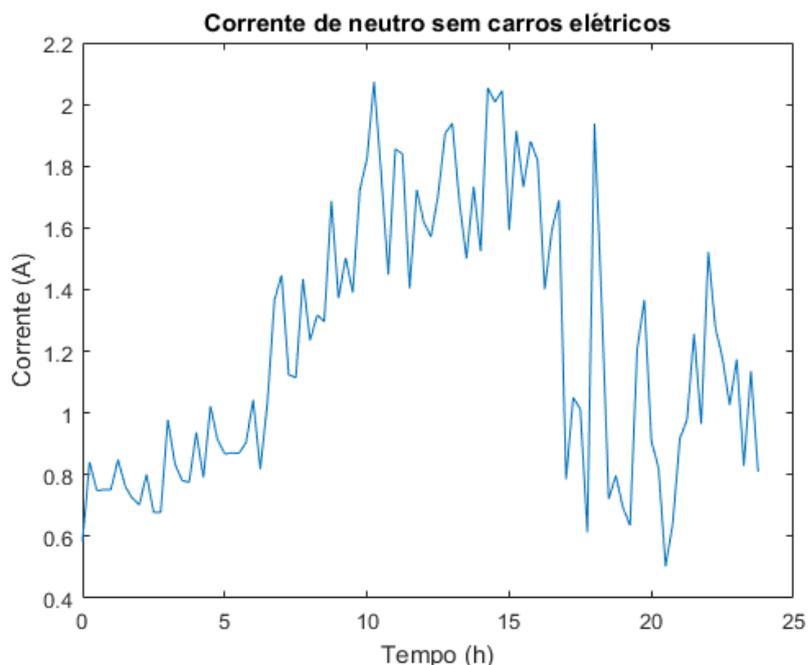


Figura 8. Desbalanceamento natural de sexta-feira

Em seguida, as simulações referentes às configurações de carregamento e penetração de veículo elétricos na frota total foram realizadas e seus resultados podem ser acompanhados nos tópicos seguintes.

4.3.1 Alocação Descoordenada de Veículos Elétricos

A Figura 9 apresenta os resultados referentes às simulações realizadas na sexta-feira, considerando uma configuração de carregamento descoordenada.

Observado os resultados referentes uma penetração de 10%, nota-se que claramente através do gráfico superior esquerdo como os veículos elétricos desequilibram o sistema em horários próximos ao de pico, comportamento semelhante ao observado na quarta-feira. Com relação à corrente do neutro, observa-se que a mesma apresenta valor significativamente

superior à situação sem a presença de veículos elétricos, indicando que a distribuição irregular de veículos entre as fases desfavorece o sistema. Uma análise similar pode ser feita quando considera-se uma penetração de 40% de veículos elétricos. O nível de desbalanceamento pode ser atestado pelo gráfico superior direito, que indica as correntes de cada fase deste sistema. Este desequilíbrio ocorre principalmente em decorrência do aumento de carga. Este aumento de carga leva a um aumento no desbalanceamento, como notado na curva que representa a corrente no condutor neutro para esta situação.

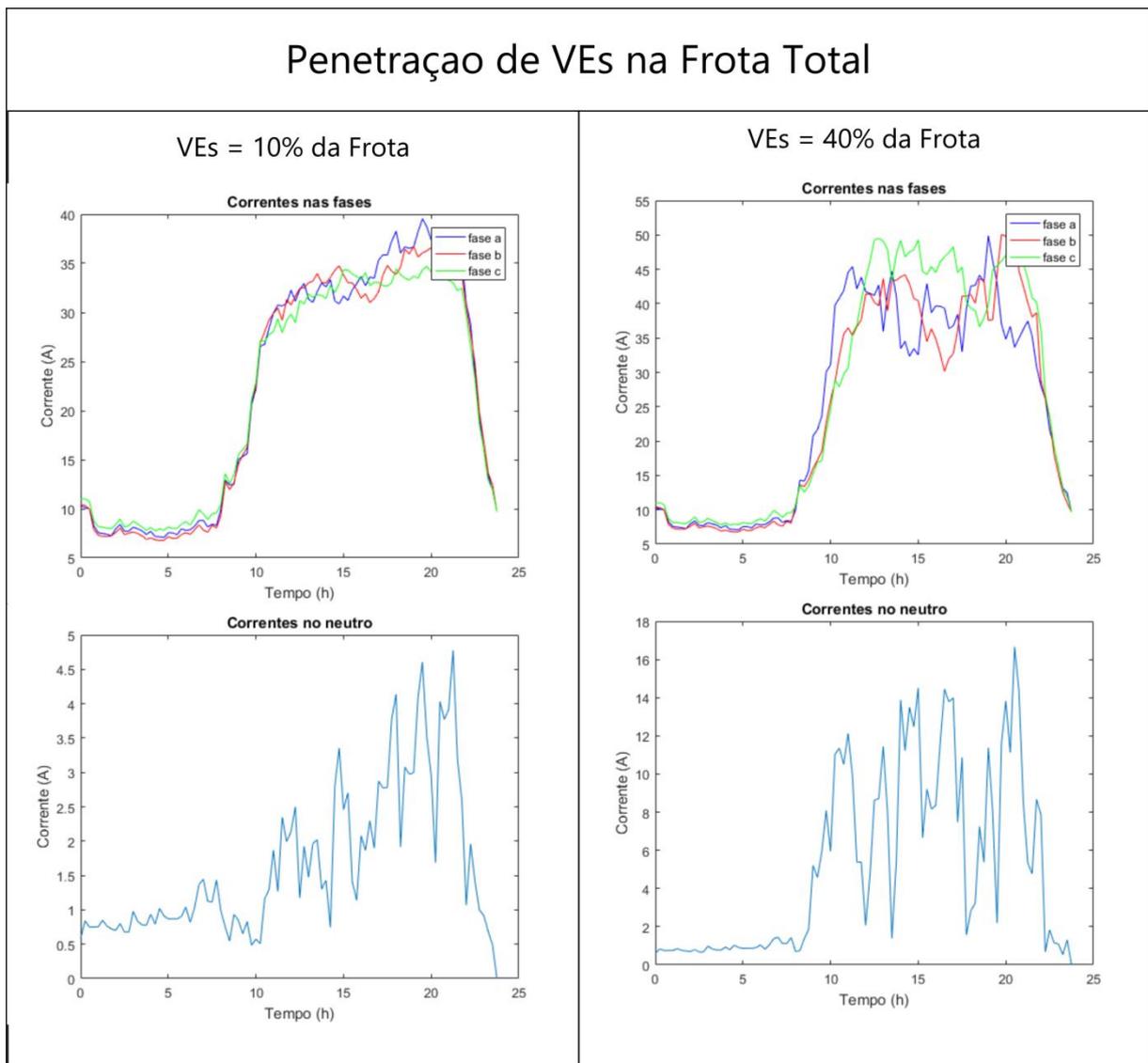


Figura 9. Resultados das simulações para sexta-feira com carregamento descoordenado

4.3.2 Alocação Coordenada de Veículos Elétricos

A coordenação do carregamento dos veículos elétricos na sexta-feira apresentou resultados semelhantes aos obtidos para quarta-feira, salvo as diferenças causadas pelo padrão de consumo e visitas ao *Shopping Center* nos dois dias. Os resultados são apresentados na Figura 10.

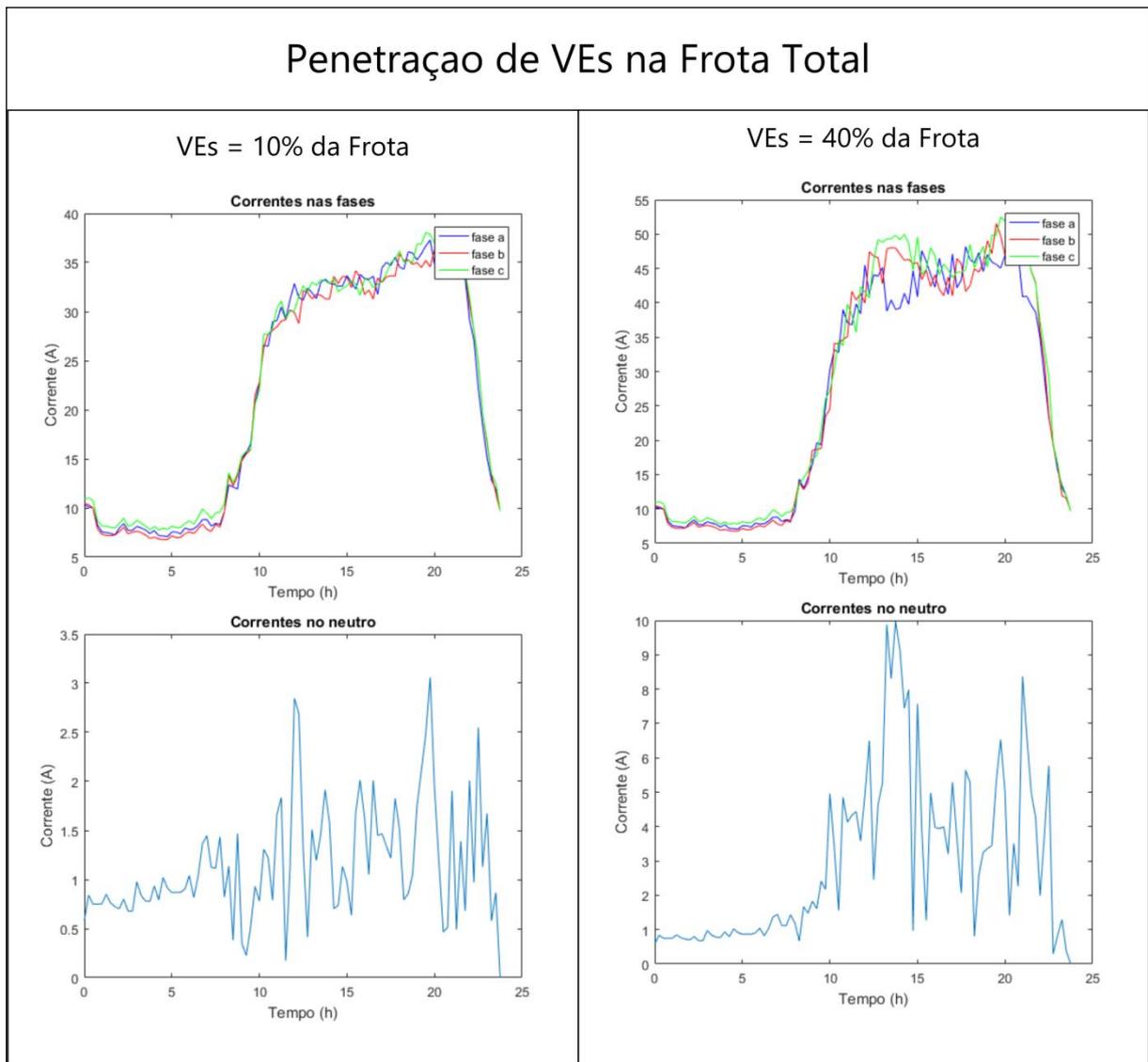


Figura 10. Resultados das simulações para sexta-feira com carregamento coordenado

Observando os resultados referentes uma penetração de 10%, nota-se que a coordenação do carregamento dos veículos elétricos ajudou a reduzir o desbalanceamento em relação ao sistema descoordenado. Este fato fica evidente tanto no gráfico superior quanto

inferior. A corrente do neutro se manteve em patamares similares ao sistema sem veículos elétricos.

Já na simulação com 40% de veículos elétricos nota-se uma melhora em relação ao sistema descoordenado, entretanto, quando comparado ao sistema sem a presença de veículos elétricos, o desbalanceamento é maior, assim como o ocorrido para a quarta-feira.

4.4 Simulações Considerando Sábado

Dando continuidade as simulações, chega-se ao sábado. Como nos casos anteriores, inicialmente obteve-se a curva de corrente do neutro para o sistema sem considerar a presença de veículos elétricos. A Figura 11 a seguir representa a corrente do neutro deste sistema considerando apenas o desbalanceamento causado pela carga natural do estabelecimento.

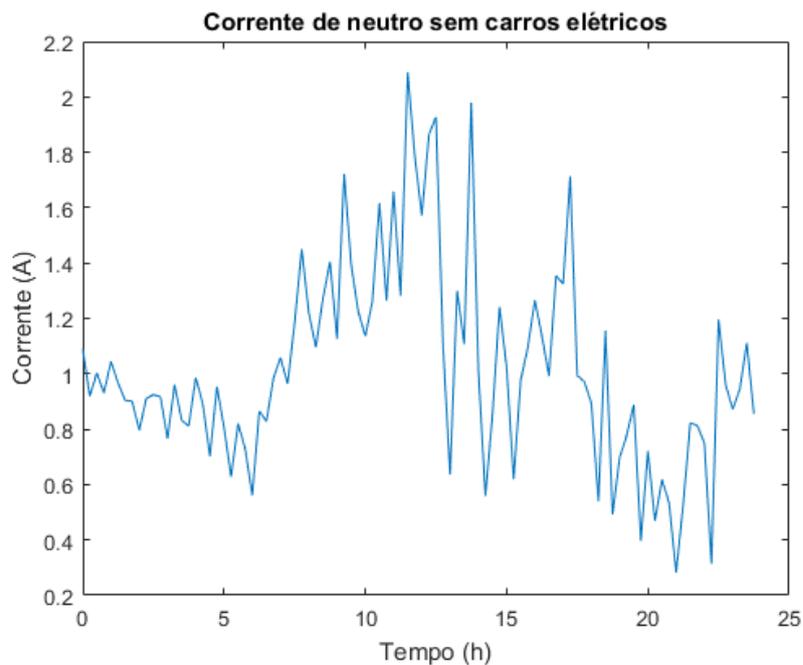


Figura 11. Desbalanceamento natural do sistema para sábado

4.4.1 Alocação Descoordenada de Veículos Elétricos

Em seguida, foram realizadas as simulações para alocação de descoordenada de veículos elétricos para o sábado. Os resultados são apresentados na Figura 12.

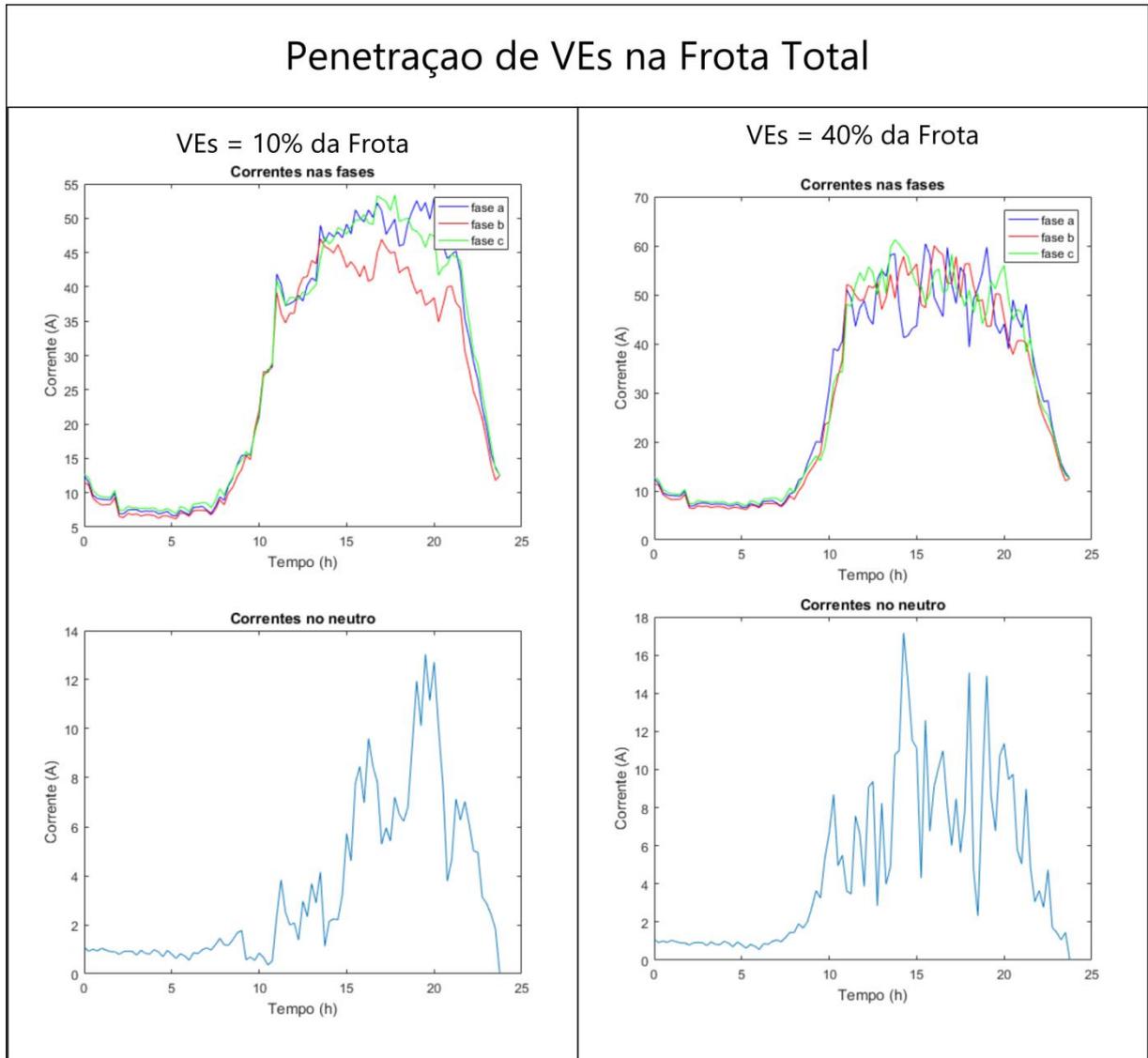


Figura 12. Resultados das simulações para sábado com carregamento descoordenado

Na simulação que considera uma presença de 10% de veículos elétricos na frota total do *Shopping Center*, observou-se um grande aumento no desbalanceamento representado pela corrente do neutro do estabelecimento, que pode ser conferida no gráfico inferior direito da Figura 12. Este desequilíbrio também é observado nas curvas das correntes de cada fase, com ênfase para o horário de pico, com maior consumo do *Shopping* e maior presença de veículos elétricos. O desequilíbrio observado neste dia é superior aos outros casos devido ao aumento no número de veículos que circulam no *Shopping* no sábado, o que implica em blocos maiores de carga oscilando entre as fases deste sistema.

Seguindo o mesmo padrão, os resultados observados para uma presença de 40% de veículos elétricos indicam um desequilíbrio mais acentuado entre as fases do sistema, tendo

como principal agravante o aumento na carga. Esta elevação no desequilíbrio pode ser observada pela diferença entre as correntes de fase deste sistema e pelos valores elevados da corrente do neutro, indicando um desbalanceamento mais elevado nos horários de pico.

4.4.2 Alocação Coordenada de Veículos Elétricos

Os resultados referentes a alocação coordenada de veículos são apresentados na Figura 13.

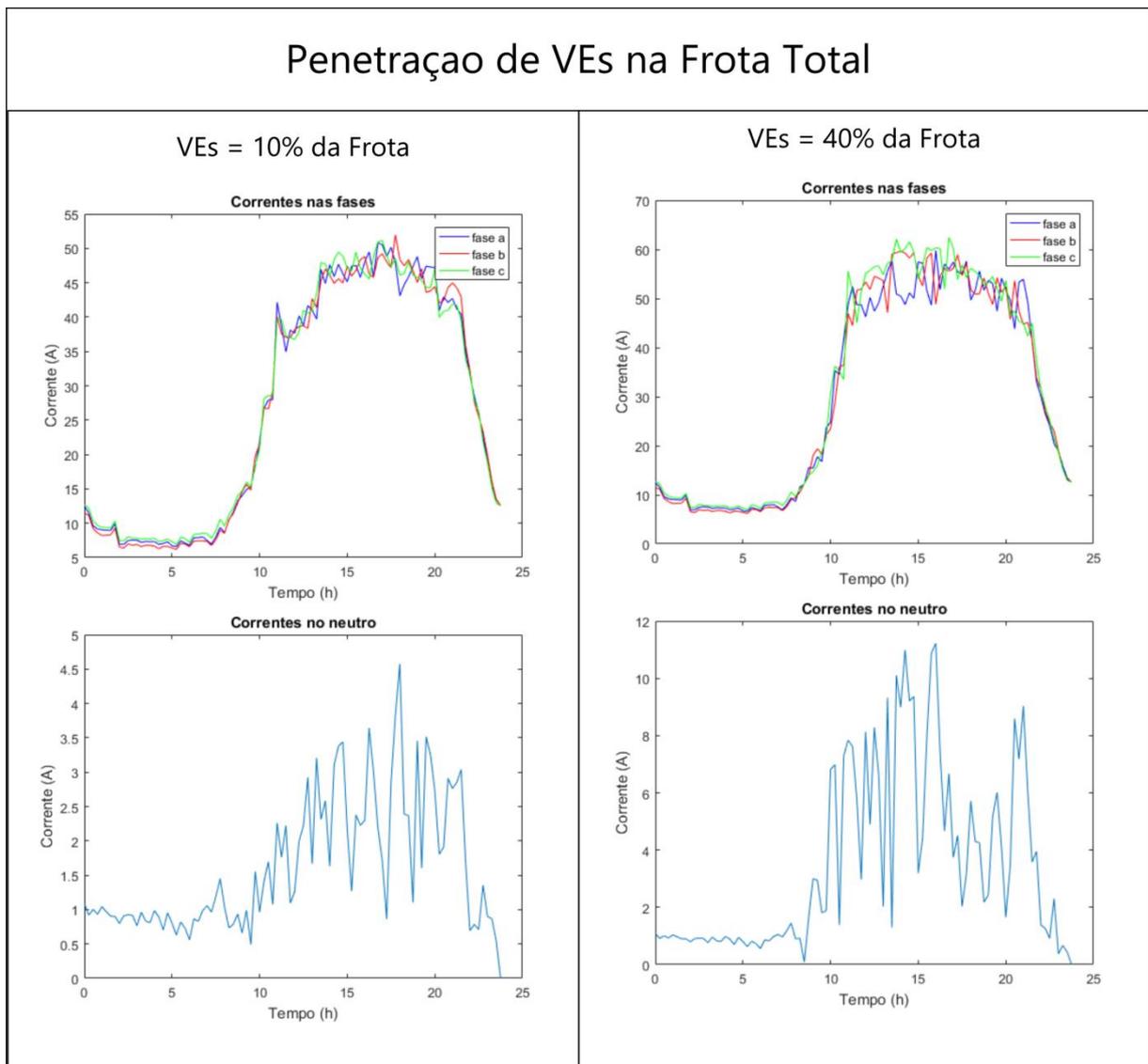


Figura 13. Resultados das simulações para sábado com carregamento coordenado

Observa-se que para uma penetração de 10% de veículos elétricos, o desequilíbrio é significativamente inferior a um sistema com carregamento descoordenado. Por outro lado, quando comparado ao resultado obtido sem a presença de veículos elétricos, este sistema apresenta um desequilíbrio superior, indicado pelos gráficos superior e inferior da Figura 13. Este comportamento pode ser explicado devido a maior presença de veículos elétricos no estabelecimento nos dias de sábado, o que aumenta a carga do estabelecimento. Aliado a este aumento de carga, o fato da saída de veículos elétricos do *Shopping* ainda ser aleatória leva a um aumento no desbalanceamento.

Seguindo o mesmo raciocínio, o sistema com uma penetração de 40% de veículos elétricos, embora tenha apresentado resultados satisfatórios em relação a configuração descoordenada, ainda assim mostrou-se mais desequilibrado em relação a situação na qual não é considerada a presença de veículos elétricos. O motivo deste comportamento é o aumento na carga, causado pelo número maior de veículos elétricos no *Shopping*, o que eleva o nível de corrente do estabelecimento e por consequência, eleva também a corrente do neutro. Além disso, assim como citado nas simulações anteriores o fato da saída dos clientes ser aleatória, leva a uma oscilação indesejada no nível de carga deste estabelecimento, que tende a aumentar conforme o número de clientes entrando e saindo do *Shopping* aumente.

4.5 Simulações Considerando Domingo

Por fim, esta simulação chega ao último dia analisado: domingo. Como realizado nos procedimentos anteriores, inicialmente verificou-se a corrente natural do condutor neutro para este estabelecimento no domingo, afim de estabelecer um parâmetro de comparação e identificar o impacto dos veículos elétricos no desequilíbrio entre as fases deste centro comercial em função das diferentes configurações de carregamento estudadas neste trabalho.

A Figura 14 a seguir representa a corrente do neutro obtida considerando o sistema sem a presença de veículos elétricos.

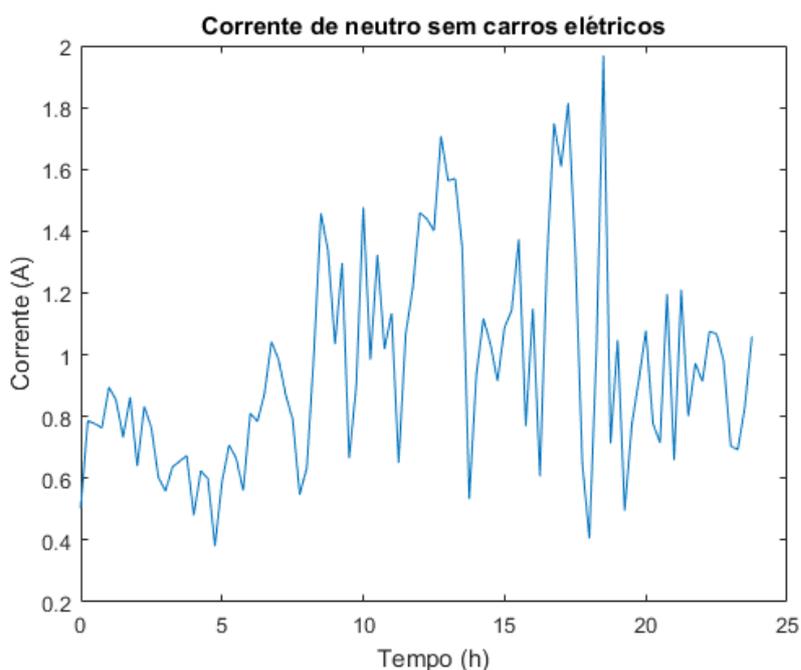


Figura 14. Desbalanceamento natural para domingo

4.5.1 Alocação Descoordenada de Veículos Elétricos

A alocação descoordenada de veículos elétricos no domingo mostrou-se o pior de todos os casos para um sistema de carregamento com configuração descoordenada. Devido ao padrão incomum de fluxo de veículos do domingo, que apresenta grande número de entradas e saídas de veículos ao longo de todo o dia, mesmo uma parcela de 10% de veículos elétricos consegue elevar o desequilíbrio deste sistema a patamares superiores aos observados nos casos anteriores.

O desbalanceamento fica claro nas curvas de corrente de fase no canto superior esquerdo da Figura 15, onde as correntes de fase mostram valores bem distintos durante todo o horário de pico. A corrente do neutro também apresenta valores bem superiores como pode ser constatado no gráfico inferior esquerdo.

Com relação à simulação considerando 40% de veículos elétricos, o nível de desbalanceamento também é muito elevado, como esperado, dado o aumento de carga do sistema representado pelo elevado fluxo de veículos.

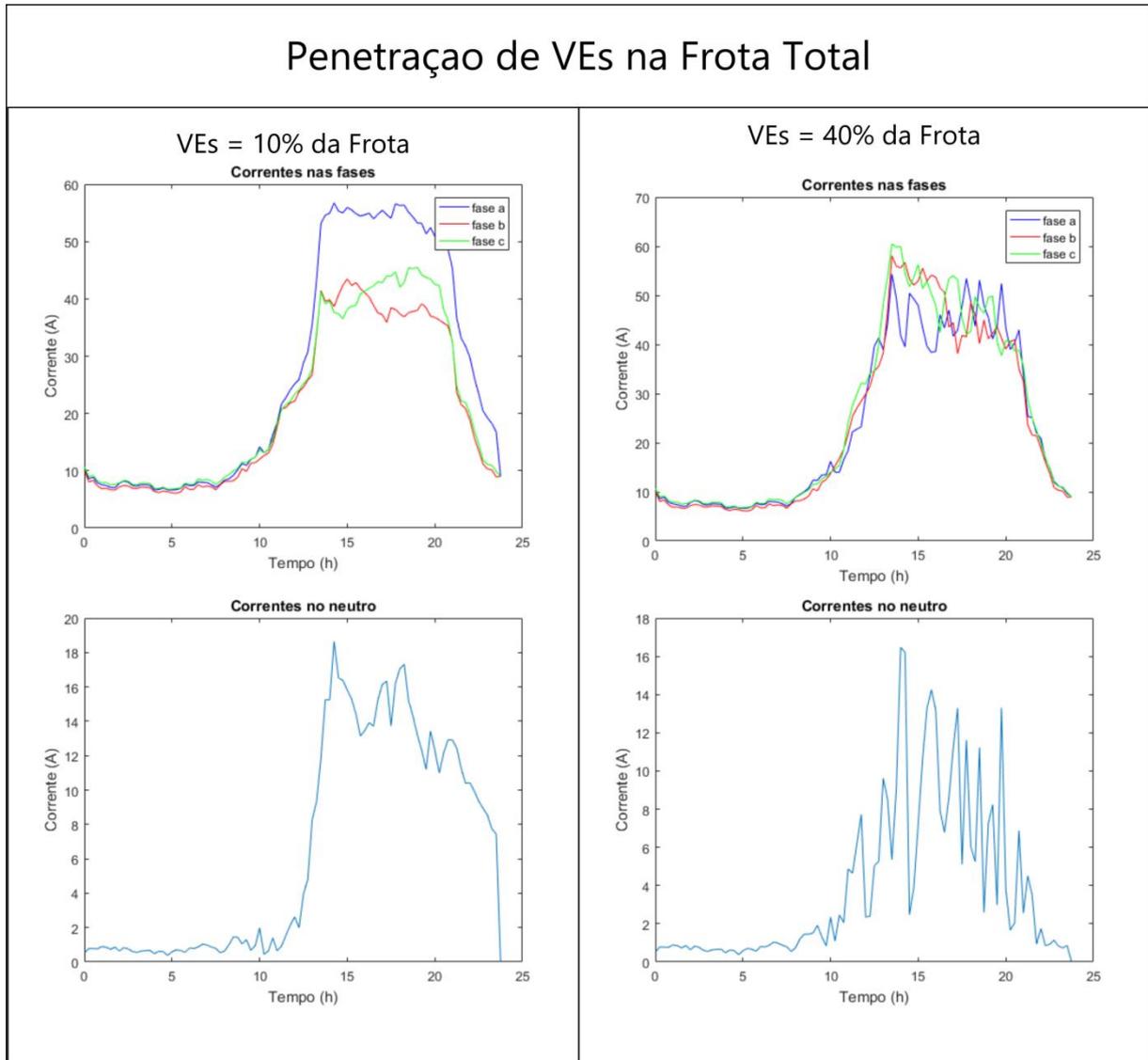


Figura 15 . Resultados das simulações para domingo com carregamento descoordenado

4.5.2 Alocação Coordenada de Veículos Elétricos

Para o dia de domingo, a configuração coordenada para 10% de veículos elétricos mostrou-se muito eficiente, ao manter o nível de desequilíbrio próximo ao de uma situação sem veículos elétricos e visivelmente inferior em relação ao sistema descoordenado. A melhora em relação ao sistema descoordenado também é significativa para um sistema contendo 40% de veículos elétricos, como pode ser observado na Figura 16. Entretanto, neste caso o desequilíbrio ainda é superior ao apresentado em um sistema sem a presença de veículos elétricos, fato que

pode ser explicado devido ao aumento na carga representado pelos veículos elétricos, como exposto nas simulações anteriores.

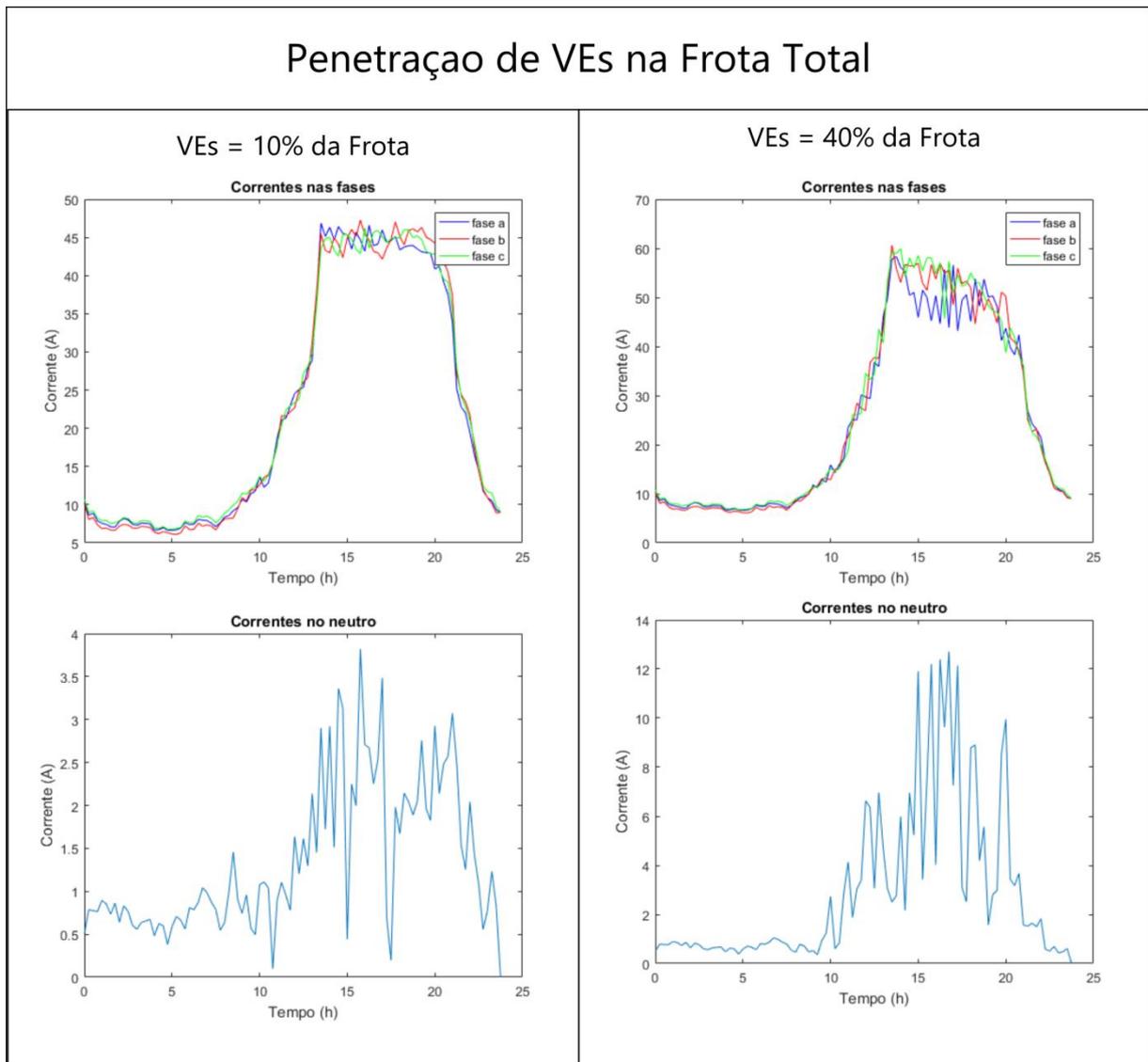


Figura 16. Resultados das simulações para domingo com carregamento coordenado

4.6 Comparação entre os Métodos

A análise do desbalanceamento do sábado mostrou que deixar os carros escolherem a fase de carregamento pode ser um problema em estabelecimentos comerciais. Para uma análise mais completa, foram realizadas simulações para todos os dias da semana, considerando os dois

métodos de carregamento (aleatório e coordenado) e os dois valores de penetração de veículos elétricos (10% e 40%). Como ambos os algoritmos possuem aleatoriedades, as simulações foram repetidas 100 vezes para validar os resultados.

Os resultados obtidos nas simulações com 10% e 40% de penetração de carros elétricos são apresentados nas Tabela 2 e Tabela , respectivamente. Os valores expressos nas tabelas são a porcentagem do pico da corrente de neutro que considera o carregamento em função do pico da corrente de neutro normal do *Shopping Center*.

Tabela 2. Mínima e máxima corrente de neutro em porcentagem da corrente normal, considerando 10% de penetração de veículos elétricos

Dia da Semana	Carregamento Aleatório		Carregamento Coordenado	
	Mínimo %	Máximo %	Mínimo %	Máximo %
Quarta	275,84	752,96	82,65	200,06
Sexta	265,28	953,10	133,51	414,20
Sábado	396,37	949,47	160,16	644,11
Domingo	353,83	949,75	166,12	292,99

Tabela 3. Mínima e máxima corrente de neutro em porcentagem da corrente normal, considerando 40% de penetração de veículos elétricos

Dia da Semana	Carregamento Aleatório		Carregamento Coordenado	
	Mínimo %	Máximo %	Mínimo %	Máximo %
Quarta	694,36	2852,24	294,26	1080,06
Sexta	1318,30	3710,59	403,54	1490,78
Sábado	1435,70	3470,41	560,05	2454,10
Domingo	1670,73	3709,90	610,94	2292,68

A Tabela 2 e a Tabela reafirmam que o carregamento de veículos elétricos pode aumentar de forma significativa o desbalanceamento do sistema do *Shopping Center* e, dessa forma, aumentar as perdas do sistema. Entretanto, a coordenação de tais veículos mostrou ser uma maneira interessante de reduzir o desbalanceamento, quando comparada ao carregamento descoordenado.

Destaca-se que em algumas simulações realizadas para a quarta-feira, com coordenação e 10% de penetração de veículos elétricos, o pico da corrente de neutro foi menor do que a corrente normal do *Shopping Center*. Dessa forma, percebe-se que o carregamento coordenado de veículos elétricos pode inclusive reduzir o desbalanceamento e, conseqüentemente, as perdas do *Shopping Center*.

Outro ponto importante é o impacto que o aumento no número de veículos causa no valor de pico da corrente de neutro. Uma penetração de 40%, se realizado o carregamento de forma aleatória, pode aumentar o pico da corrente em até 3700%.

Capítulo 5

Conclusões

Neste trabalho foi avaliado o impacto de que veículos elétricos poderiam causar no desequilíbrio de fases de um *Shopping Center*, e foi proposto um modelo de organização de veículos elétricos entre as fases deste *Shopping* como medida para mitigar eventuais problemas de desbalanceamento.

Inicialmente, foram apresentados trabalhos semelhantes que também estudavam a relação entre a distribuição desigual de veículos elétricos entre as fases de um sistema trifásico e como isso poderia impactar o desequilíbrio de tensão neste sistema.

Em seguida, foram introduzidos conceitos sobre desequilíbrio de tensão e modelos de veículos elétricos e sistemas de carregamento, a fim de fornecer uma base teórica para a simulação e a solução proposta.

A seguir, foram apresentados dados sobre *Shopping Center* estudado, e o fluxo esperado de veículos elétricos para este estabelecimento, considerando estes dados, as simulações foram então realizadas considerando que os veículos fossem distribuídos de forma coordenada e descoordenada entre as fases deste sistema. A simulação foi repetida levando em conta os diferentes padrões de fluxo de veículos do estabelecimento, além de diferentes taxas de penetração de veículos elétricos na frota total de veículos, 10% para o caso mais conservador e 40% considerando uma situação com alta penetração de veículos elétricos.

Os resultados mostraram que quando o carregamento dos veículos elétricos ocorre de maneira coordenada, o impacto dos veículos elétricos no desequilíbrio do *Shopping* é baixo, mesmo considerando uma penetração de 40% de VE na frota total. Sendo que no caso mais conservador, a coordenação dos veículos elétricos entre as fases do sistema pode inclusive

contribuir para a redução no desequilíbrio de fases do *Shopping*, se comparado ao sistema sem a presença de veículos elétricos.

Com relação ao carregamento descoordenado, observou-se piora no desequilíbrio de fases do sistema em ambos os casos, com baixa e alta penetração de veículos elétricos, o que poderia causar sérios problemas ao sistema elétrico do estabelecimento comercial,

Estes resultados demonstram a importância da realização de um estudo profundo antes da implementação de postos de carregamento de veículos elétricos. Além de considerar a capacidade do sistema de fornecer a carga demandada pelos veículos, também deve ser levado em conta a forma como essa carga será distribuída entre as fases, a fim de minimizar os impactos no sistema a qual está conectada.

Referências Bibliográficas

AKHTAR, Z.; BALARKO, C.; HUI, S. Y. R. Smart loads for voltage control in distribution networks. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 8, n. 2, p. 937-946, mar. 2017.

BUNGA, S. K. **Impact of plug in vehicle battery charging on a distribution system**. Dissertação de Mestrado – University of Tennessee at Chattanooga, Chattanooga, Tennessee, 2013. 82 p.

CÁRDENAS, C. B. B. **Geração de viagens e demanda por estacionamento em *Shopping Centers* do interior do estado de São Paulo**. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2003. 195 p.

CHANG, D. et al. **Financial viability of non-residential electric vehicle charging stations**. Luskin Center for Innovation – University of California, Los Angeles, California, 2012.

DEY, N.; CHAKRABORTY, A. K. Neutral current and voltage in a three phase four wire distribution system of a technical institution. **International Journal of Computer Applications**, v. 72, n. 3, mai. 2013.

EPRI. . Environmental assessment of plug-in hybrid electric vehicles – volume 1: nationwide greenhouse gas emissions. **Electric Power Research Institute**. 2007.

ESMAILI, M.; GOLDOUST, A. Multi-objective optimal charging of plug-in electric vehicles in unbalanced distribution networks. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 73, p. 644-652, 2015.

EBERHARD, A. **Power Quality**, InTech, 1ª edição, Rijeka, Croácia, 2011.

FARAHANI, H. F. Improving voltage unbalance of low-voltage distribution networks using plug-in electric vehicles. **Journal of Cleaner Production**, v. 148, p. 336-346, 2017.

GARCIA, D. C. **Avaliação e minimização do desequilíbrio de tensão: estimativa por análise incremental e soluções analíticas**. Dissertação de Mestrado – Universidade Brasília, Brasília, DF, 2007. 96 p.

GRAY, M. K.; MORSI, W. G. Economic assessment of phase reconfiguration to mitigate the unbalance due to plug-in electric vehicles charging. **Electric Power Systems Research**, v. 140, p. 329-336, 2016a.

GRAY, M. K.; MORSI, W. G. Probabilistic quantification of voltage unbalance and neutral current in secondary distribution systems due to plug-in battery electric vehicles charging. **Electric Power Systems Research**, v. 133, p. 249-256, 2016b.

IEA. Global EV outlook 2016 – beyond one million electric cars. **International Energy Agency**. 2016.

MOGHBEL, M.; MOHAMMAD, A. S. M.; FERREIDOUNI, A. Decentralize coordinated charging of plug-in electric vehicles in unbalanced residential networks to control distribution transformer loading, voltage profile and current unbalance. **Intelligent Industrial Systems**, v. 1, n. 2, p.141-151, 2015.

NEAIMEH, M. et al. A probabilistic approach to combining smart meter and electric vehicle charging data to investigate distribution network impacts. **Applied Energy**, v.157, p. 688-698, 2015.

PEREIRA, G. G. **Modelo de Atração de Automóveis por Shopping Center**. Boletim Técnico, Companhia de Engenharia de Tráfego, São Paulo, SP, 2011.

QUIRÓS-TORÓS, J.; OCHOA, L. F.; ALNASER, S. W.; BUTLER, T. Control of EV charging points for thermal and voltage management of LV networks. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 31, n. 4, p. 3028-3039, jul. 2016.

SHAHNIA, F.; WOLFS, P. J.; GOSH, A. Voltage unbalance reduction in low voltage feeders by dynamic switching of residential customers among three phases. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 5, n. 3, p. 1318-1327, mai. 2014.

SILVA, G. I. M. et al. Voltage unbalance reduction in large distribution consumers by coordinated charging of electrical vehicles. 12th Latin-American Congress on Electricity and Transmission - CLAGTEE, Mar del Plata, Argentina, nov. 2017.

TEODORO, G. R. **Metodologia para compensação de desequilíbrio em redes elétricas**. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP, 2005. 84 p.

UL-HAQ, C.; CECATI, K.; ABBASI, E. Impact of electric vehicle charging on voltage unbalance in an urban distribution network. **Intelligent Industrial Systems**, v. 1, n. 1, p.51-60, 2015.

WECKW, S.; DRIESEN, J. Load balancing with EV chargers and PV inverters in unbalanced distribution grids. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, v. 6, n. 2, p. 635-643, abr. 2015.