UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MARCELO BRUNORO

MODELAGEM DE CARGAS HARMONICAMENTE ACOPLADAS PARA O SISTEMA ELÉTRICO

VITÓRIA

2018

MARCELO BRUNORO

MODELAGEM DE CARGAS HARMONICAMENTE ACOPLADAS PARA O SISTEMA ELÉTRICO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Frizera Encarnação
Coorientadora: Profª Drª Jussara Farias Fardin

VITÓRIA

2018

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Tecnológica,
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)
Sandra Mara Borges Campos – CRB-6 ES-000593/O

B898m

Brunoro, Marcelo, 1971-
Modelagem de cargas harmonicamente acopladas para o sistema elétrico / Marcelo Brunoro. – 2018.
136 f. : il.

Orientador: Lucas Frizera Encarnação.
Coorientador: Jussara Farias Fardin.
Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Sistemas elétricos de potência. 2. Sistemas de energia elétrica. 3. Estimação de parâmetros. 4. Carga e distribuição elétrica. 5. Análise harmônica. 6. Modelagem computacional. I. Encarnação, Lucas Frizera. II. Fardin, Jussara Farias. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 621.3

MARCELO BRUNORO

MODELAGEM DE CARGAS HARMONICAMENTE ACOPLADAS PARA O SISTEMA ELÉTRICO

Tese submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 9 de janeiro de 2018.

COMISSÃO EXAMINADORA

Lucas Frizera Encarnação

Prof. Dr. Lucas Frizera Encarnação
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Jussara Farias Fardin

Profª Drª Jussara Farias Fardin
Universidade Federal do Espírito Santo
Coorientadora

Prof. Dr. Carlos Frederico Meschini Almeida
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Examinador Externo

Prof. Dr. Wagner Teixeira da Costa
Instituto Federal do Espírito Santo
Examinador Externo

José Leandro Félix Salles

Prof. Dr. José Leandro Félix Salles
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador Interno

José Luiz F. Vieira

Prof. Dr. José Luiz de Freitas Vieira
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador Interno

Aos meus pais.

À minha esposa e minhas filhas.

AGRADECIMENTOS

A Deus por abençoar minha vida, iluminar meu caminho e me dar forças para prosseguir.

Aos meus pais, Magdalena e Ezelino (*in memoriam*), pelo exemplo de sabedoria, fé e perseverança.

À minha esposa Cecilia e minhas filhas, Isabela e Elisa, pelo amor incondicional, motivação, companheirismo e compreensão.

Aos meus amigos e minha família, especialmente meus irmãos, pelo carinho e incentivo.

Aos professores, Lucas Frizera Encarnação e Jussara Farias Fardin, pela confiança, amizade, paciência e oportunidade de tê-los como orientadores.

À Comissão Examinadora, pelas valiosas contribuições para este trabalho.

Aos colegas do Laboratório de Eletrônica de Potência e Acionamento Elétrico (LEPAC), sobretudo aos professores José Luiz de Freitas Vieira e Domingos Sávio Lyrio Simonetti.

Aos professores da Coordenadoria de Eletrotécnica do Ifes – Vitória, por todo o apoio.

Ao Ifes, pela concessão do afastamento durante a parte crucial desta tese.

RESUMO

Modelos do sistema elétrico são importantes para permitir a realização de diversos estudos, visando a redução de perdas, melhoria da qualidade da energia, entre outros. No cenário atual a realização de análises harmônicas torna-se necessária devido à crescente inserção de cargas não lineares no sistema. Uma vez que os perfis de tensão e corrente das redes são fortemente afetados pelo comportamento da carga, sua modelagem é essencial para realizar tais análises. Diferente dos outros modelos harmônicos encontrados a literatura, esta tese apresenta duas novas propostas de modelagem de carga. A primeira proposta combina o modelo ZIP e uma matriz de admitância cruzada. Esta combinação reúne os benefícios da caracterização de cargas pelo tradicional modelo ZIP, que provê algum conhecimento físico sobre a carga, bem como o cruzamento de frequências dado por uma matriz de admitância. Neste caso, procura-se limitar os coeficientes ZIP, visando identificar a proporção da potência em termos de impedância constante, corrente constante e potência constante. Além disso, é discutido o método para a determinação dos parâmetros do modelo, usando busca exaustiva e regressão linear múltipla. Na segunda proposta, o novo modelo é baseado em um circuito que agrega componentes de impedância, corrente e potência, em uma configuração diferente daquelas encontradas na literatura. O acoplamento entre várias ordens harmônicas é proporcionado por uma matriz de correntes constantes. O método de regressão linear múltipla é utilizado para determinar os parâmetros do modelo. Aspectos relacionados à seleção de dados e à determinação da quantidade de amostras são abordados nas duas propostas. Em ambos os casos foi possível determinar de forma acurada a injeção harmônica no barramento da carga, mediante o conhecimento da sua tensão de alimentação. Estudos de caso com uma carga real, usando dados obtidos com um medidor de qualidade de energia, exemplificam a aplicação dos modelos em uma carga eletrônica. Vários outros estudos de caso foram implementados, utilizando um *software* simulador de transitórios eletromagnéticos, para evidenciar a eficácia dos modelos propostos em diferentes cargas. Em um destes estudos, foi aplicada a metodologia proposta para a modelagem harmônica de um conjunto de cargas conectadas a uma rede radial. Os resultados obtidos no estudo da carga experimental, bem como nos demais estudos de caso, mostraram que os modelos propostos foram capazes de representar o comportamento harmônico das cargas avaliadas com elevada exatidão.

Palavras-chave: Modelagem de carga. Modelagem harmônica de carga. Sistema elétrico de potência. Estimação de parâmetros.

ABSTRACT

Modeling of electrical systems is important to allow carrying out several studies aiming at reducing losses and improving energy quality, among others factors. In the current scenario, performing harmonic analyses has become necessary due to the increasing insertion of nonlinear loads in the system. Since the voltage and current profiles of the networks are strongly affected by the load behavior, their modeling is essential to carry out such analyses. Differently from the other harmonic models found in the relevant literature, this thesis presents two new proposals for load modeling. The first proposal combines the ZIP model and a cross admittance matrix. This combination brings together the benefits of load characterization using the traditional ZIP model, which provides some physical knowledge about the load, as well as the frequency crossing given by an admittance matrix. In this case, ZIP coefficients are intended to be limited in order to identify the power ratio in terms of constant impedance, constant current and constant power. In addition, we discussed the method for determining the model parameters, using exhaustive search and multiple linear regression. In the second proposal, the new model is based on a circuit that aggregates components of impedance, current and power, in a configuration different from those found in the relevant literature. Coupling between various harmonic orders is provided by a constant current matrix. The multiple linear regression method is used to determine the model parameters. Aspects related to data selection and number of samples are addressed in both proposals. In both cases it was possible to accurately determine the harmonic injection in the load bus, by understanding its voltage supply. Case studies with a real load, using data obtained with a power quality meter, exemplify the application of the models in an electronic load. Several other case studies were implemented using electromagnetic transient simulator software to demonstrate the effectiveness of the proposed models in different loads. In one of these studies, the proposed methodology was applied for the harmonic modeling of a set of loads connected to a radial network. The results obtained in the study of the experimental load, as well as in the other case studies, showed that the proposed models were able to represent the harmonic behavior of the evaluated loads with high accuracy.

Keywords: Load modeling. Harmonic load modeling. Electrical power system. Parameter estimation.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE GRÁFICOS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE QUADROS

LISTA DE SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ATC – *Available Transfer Capability* (Capacidade Disponível de Transferência de Potência)

CVR – *Conservation Voltage Reduction* (Conservação de Energia por Redução de Tensão)

DTT% – Distorção Harmônica Total de Tensão

EPRI – *Electric Power Research Institute* (Instituto de Pesquisa em Energia Elétrica)

FFT – *Fast Fourier Transform* (Transformada Rápida de Fourier)

GPS – *Global Positioning System* (Sistema de Posicionamento Global)

IEC – *International Electrotechnical Commission* (Comissão Eletrotécnica Internacional)

IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos)

PMU – *Phasor Measurement Unit* (Unidade de Medição Fasorial)

PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

PSCAD – *Power Systems Computer Aided Design* (*software* de simulação de transitórios eletromagnéticos para sistemas de potência)

RTOCD – Retificador Trifásico de Onda Completa a Diodo

SEP – Sistema Elétrico de Potência

ZIP – componentes polinomiais de impedância (Z), corrente (I) e potência (P) constante

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos sobrepostos

·	Valor fasorial
–	Valor normalizado
^	Valor estimado

Símbolos subscritos

0	Valor inicial
P, *p*	Referente à potência constante ou potência ativa
Q, *q*	Referente à potência reativa
f	Referente à frequência
Z	Referente à impedância constante
I	Referente à corrente constante
L	Referente à carga
N	Referente ao modelo de Norton
h, *v*	Ordem harmônica
odd	Referente às componentes harmônicas ímpares
pos	Referente às componentes harmônicas ímpares não múltiplas de 3
S	Referente à potência aparente ou ao sistema
min	Valor mínimo
max	Valor máximo

Símbolos sobrescritos

h, *v*	Ordem harmônica
*	Conjugado complexo
m	Referente à *m*-ésima medida
T	Matriz transposta
i	Referente à *i*-ésima iteração
fit	Valor obtido através da regressão linear
exa	Valor obtido através da busca exaustiva
max	Valor máximo

Símbolos de variáveis[1]

V	Tensão (V)
P	Potência ativa (W)
Q	Potência reativa (VAr)
f	Frequência fundamental (Hz)
K	Constante
p, *q*, *k*	Coeficiente do modelo ZIP
I, *i*	Corrente (A)
Y	Admitância (S)
h, *v*	Ordem harmônica
N	Maior ordem harmônica considerada no modelo

[1] Variáveis matriciais são representadas em negrito e sem itálico.

Símbolos de variáveis (continuação)

DDT	Distorção harmônica total de tensão
S, ΔS	Potência aparente (VA)
j	Unidade imaginária de um número complexo
G	Condutância (S)
B	Susceptância (S)
M	Quantidade de amostras
e, E, ε	Erro
φ, ϕ, β, Φ	Matriz de observação
θ	Parâmetro do modelo
Z	Impedância (Ω)
t	Tempo (s)
ϕ	Ângulo (°)
ω	Frequência angular (rad/s)
R	Resistência (Ω)
X	Reatância (Ω)
y, β	Variável de saída

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO

Mudanças de concepção e funcionamento dos componentes de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, juntamente com a ampliação das redes interconectadas, estimularam o desenvolvimento de técnicas de análise do Sistema Elétrico de Potência (SEP). Tais técnicas demandam a representação de vários elementos, como fontes, redes, eventos e cargas, sendo que o modelo adotado para cada elemento deve ser adequado ao tipo de análise pretendida. Porém, somente aplicando modelos com elevada exatidão é possível identificar os limites operacionais do sistema e, assim, estabelecer medidas para que ele funcione dentro destes limites e de modo mais eficiente. Portanto, para o sistema, torna-se cada vez mais importante e necessário desenvolver análises e modelos acurados, os quais dependem diretamente das características da carga (KERSTING, 2012).

1.1 Importância da Modelagem de Cargas

Considerando que as cargas exercem grande influência no perfil da tensão dos barramentos e da corrente circulante da rede, a representação de cargas tem impacto significativo em análises e funções de controle do sistema elétrico (SAMUI; SAMANTARAY, 2016; TERZIJA et al., 2011). Porém, os modelos de carga são os menos conhecidos entre os diversos componentes do sistema (SASIDHARAN et al., 2015). As diferentes e mais complexas características das cargas modernas, em relação a cargas mais antigas, requerem estudos detalhados do seu comportamento real em estudos de fluxo de potência e em análises harmônicas. Muitos problemas de análise do sistema elétrico consideram cargas de valor constante ignorando sua dependência em relação à tensão, corrente e frequência. Assim, a falta de modelos apropriados para a representação de cargas reais, nas análises do sistema, pode produzir resultados equivocados (SASIDHARAN et al., 2015; VULETIĆ; TODOROVSKI, 2016). Todos estes fatores tornam desafiador a modelagem da carga para aplicações no SEP.

A modelagem de cargas conectadas aos barramentos do sistema é complexa e requer simplificações. Tal dificuldade ocorre devido à diversidade destas cargas e de sua mudança de composição, dependendo de fatores temporais, climáticos, econômicos, entre outros. É impraticável representar individualmente cada carga de um SEP, usualmente contendo milhões de cargas, mesmo se a composição de cada uma fosse conhecida exatamente. Em sistemas de transmissão a representação da carga agregada usualmente inclui dispositivos de carga, efeito dos transformadores abaixadores das subestações, alimentadores de subtransmissão, alimentadores de distribuição, transformadores de distribuição, reguladores de tensão e dispositivos de compensação de reativos (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994; TERZIJA et al., 2011). Segundo Rudion e outros (2009), a modelagem de cargas do SEP é importante para realizar simulações e, em especial, para a análise do fluxo de potência e para diversos estudos de estabilidade. Entretanto, modelos inapropriados ou imprecisos podem fornecer resultados ambíguos.

Diversos estudos sobre o SEP são necessários para avaliar as consequências da inclusão de novos clientes e o estado atual do sistema (BALCI et al., 2008). Estas análises podem ser utilizadas para o planejamento de melhorias e ampliação da rede atual, além de serem necessárias para projetos visando a correção do fator de potência e para mitigar distorções harmônicas. O posicionamento de medidores e de novas unidades de geração distribuída são outros exemplos de estudos acerca do SEP.

Vários fatores têm tornado cada vez mais desafiador o planejamento e controle do sistema elétrico, visando aumentar sua robustez e atender critérios normativos. Entre estes fatores pode-se citar: desbalanceamento entre a potência gerada e demandada, intensificação da geração distribuída de fontes renováveis empregando conversores estáticos de energia, e elevação da quantidade de cargas não lineares com dispositivos chaveados e dispositivos magnéticos saturados. Os conversores estáticos são as maiores cargas não lineares utilizadas pela indústria para diferentes propósitos, como na variação de velocidade de motores e fontes ininterruptas de energia. Entre os típicos dispositivos produtores de correntes harmônicas estão os retificadores, largamente usados em fontes chaveadas, cicloconversores e inversores de frequência empregados no controle de velocidade de motores e na geração distribuída. Logo, para manter o SEP com perdas de energia reduzidas e com o perfil de tensão e corrente desejados, são necessários diversos estudos e análises acerca do sistema. No entanto, estes estudos devem proporcionar níveis de qualidade, segurança, disponibilidade e confiabilidade em patamares aceitáveis, de forma economicamente viável (ARGHANDEH et al., 2014; IEEE, 2014; MOTA; MOTA, 2004; TERZIJA et al., 2011).

De acordo com IEEE (2014, p. 1, tradução nossa):

> Cargas não lineares modificam a natureza senoidal da corrente alternada (e consequentemente das quedas de tensão alternada), resultando assim em um fluxo de correntes harmônicas no sistema de potência que podem causar interferência em circuitos de comunicação e em outros tipos de equipamentos. Estas correntes harmônicas também levam ao aumento de perdas e aquecimento em uma grande quantidade de dispositivos eletromagnéticos (como motores, transformadores, entre outros). Quando a compensação de reativos, sob a forma de capacitores para melhoria do fator de potência, é utilizada, condições de ressonância podem ocorrer e podem resultar em elevados níveis de tensões harmônicas e distorção da corrente quando a condição de ressonância ocorre em uma harmônica associada às cargas não lineares.

Segundo Arrillaga e Watson (2004), é necessário examinar a influência das tensões e correntes harmônicas no sistema elétrico, onde os principais efeitos são: a possibilidade de amplificação de níveis harmônicos devido a ressonâncias; redução na eficiência da geração, transmissão e utilização da energia elétrica; envelhecimento do isolamento de componentes do sistema provocando a diminuição da sua vida útil; e mau funcionamento do sistema e de seus componentes. Além disso, os harmônicos podem interferir em sistemas de comunicação, provocar ruído audível excessivo e induzir tensões e correntes harmônicas. A ressonância pode ser paralela ou série. A ressonância paralela resulta em uma impedância elevada para a fonte harmônica, na frequência de ressonância. No caso da ressonância série há uma redução da impedância em determinado ponto do sistema, podendo provocar a circulação de correntes elevadas, mesmo para baixas tensões harmônicas. Nas máquinas rotativas as tensões harmônicas podem causar aquecimento. Tensões e correntes harmônicas aumentam as perdas nos enrolamentos do estator e do rotor, e também no núcleo da máquina. Harmônicos podem produzir pulsações de torque sobre o torque médio no eixo do motor. No sistema de transmissão as correntes harmônicas aumentam as perdas, devido ao aumento do valor eficaz da corrente, e produzem distorção na tensão, devido às quedas de tensão nas impedâncias da rede. Nos transformadores o conteúdo harmônico da corrente de carga aumenta as perdas, provocando mais aquecimento. Além disso, podem ocorrer ressonâncias entre a indutância do transformador e a capacitância do sistema. A presença de tensões harmônicas em capacitores eleva suas perdas. A presença de capacitores para correção do fator de potência pode resultar em ressonâncias locais, gerando correntes elevadas que podem danificá-los.

Normas nacionais e internacionais estabelecem requisitos e limites para as distorções harmônicas no sistema elétrico. Na norma norte-americana IEEE 519 são fornecidas recomendações para os limites de tensões e correntes harmônicas. Neste caso, propõe-se que o gerenciamento de harmônicos no sistema elétrico seja de responsabilidade conjunta entre distribuidoras de energia elétrica e unidades consumidoras. Mesmo que a unidades consumidoras limitem a injeção de correntes harmônicas no sistema, a distribuidora deve adequar as características da rede para tornar os níveis de distorções harmônicas de tensão em patamares aceitáveis. Esta norma estabelece diferentes limites percentuais para as distorções harmônicas totais de tensão, em relação às faixas de tensão no ponto de conexão (IEEE, 2014). A norma europeia IEC 61000-3-6 fornece orientações e estabelece níveis de compatibilidade para as distorções harmônicas de tensão para diferentes níveis de tensão, a fim de evitar efeitos adversos nos equipamentos dos consumidores (MCGRANAGHAN; BEAULIEU, 2006). Já a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL)[2] estabelece os procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica no Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST)[3]. Neste módulo são estabelecidos os limites para os indicadores percentuais de distorção harmônica total de tensão, em relação às faixas de tensão nominal no ponto de conexão. Além disso, estes indicadores assumem limites percentuais distintos de distorção harmônica total para: todas as ordens harmônicas; as componentes pares não múltiplas de 3; as componentes ímpares não múltiplas de 3; e as componentes múltiplas de 3. Em todos estes casos, a maior ordem harmônica considerada no cálculo não ultrapassa a ordem harmônica máxima para o indicador (ANEEL, 2017).

Devido ao aumento do uso de cargas não lineares e dispositivos eletrônicos no SEP, a injeção de correntes harmônicas nas redes de distribuição tem crescido significativamente, provocando distorção nas quedas de tensão ao longo da rede. Consequentemente, esta mudança no perfil senoidal da tensão provoca distorções até mesmo na corrente de cargas lineares conectadas ao barramento (ARGHANDEH et al., 2014; IEEE, 2014; MELO et al., 2017; SASIDHARAN et al., 2015; SEPULCHRO; ENCARNAÇÃO; BRUNORO, 2015). Atualmente, além das cargas não lineares os sistemas de distribuição são submetidos a correntes e tensões harmônicas devido ao aumento da presença de inversores de frequência para interface de sistemas renováveis de geração distribuída tanto de energia solar quanto

[2] “Autarquia sob regime especial, vinculada ao Ministério de Minas e Energia, tem a finalidade de regular e fiscalizar a produção, a transmissão, a distribuição e comercialização de energia elétrica, em conformidade com as políticas e diretrizes do governo federal. É o órgão responsável pela elaboração, aplicação e atualização dos Procedimentos de Distribuição (ANEEL, 2015)”.

[3] “Os Procedimentos de Distribuição são documentos elaborados pela ANEEL, com a participação dos agentes de distribuição e de outras entidades e associações do setor elétrico nacional, que normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica (ANEEL, 2015)”.

eólica (XAVIER et al., 2017). A existência de tensões e correntes harmônicas no sistema causa sérios problemas como: aquecimento de transformadores e condutores, mau funcionamento de equipamentos eletrônicos e aumento da demanda de potência. Consequentemente, o monitoramento harmônico tem se tornado uma importante tarefa para garantir a qualidade de energia (IEEE, 2014; MELO et al., 2017; SASIDHARAN et al., 2015; SEPULCHRO; ENCARNAÇÃO; BRUNORO, 2014). Portanto, é primordial a análise harmônica do sistema elétrico, adotando-se modelos harmônicos de cargas, visando o aumento da eficiência do sistema através da aplicação de técnicas para a redução da distorção harmônica (FERREIRA et al., 2015; LAMICH et al., 2017; MELO et al., 2017; SASIDHARAN et al., 2015). Características dos harmônicos do sistema elétrico, técnicas de modelagem e simulação de fontes harmônicas e de componentes da rede, bem como métodos de análise do fluxo harmônico, são discutidas em IEEE (1996). Técnicas de modelagem e simulação em tempo real de harmônicos variáveis no tempo são abordadas em Pak e outros (2007).

A quantidade de distorção da tensão harmônica no usuário é uma função combinada dos efeitos provocados pelas cargas que produzem correntes harmônicas de todos os usuários e das impedâncias do sistema de fornecimento. Para avaliar o comportamento harmônico da rede, os modelos devem considerar as diversas componentes harmônicas da tensão e da corrente presente no sistema. As abordagens que empregam modelos estáticos e dinâmicos não permitem caracterização da carga em relação às suas componentes harmônicas. Para este fim existem abordagens específicas como o modelo de fonte de corrente, modelo de Norton, modelo de Norton harmonicamente acoplado e modelo de matriz de admitância harmonicamente acoplada (BALCI et al., 2008; KOCH et al., 2013).

1.2 Modelos e Abordagens

Uma classificação adotada na literatura é a de modelo físico e modelo caixa preta. O modelo físico recebe esta denominação, pois fornece significado físico sobre o comportamento da carga. Por exemplo, a modelagem de um conjunto de cargas pode incorporar o motor de indução, considerando a elevada contribuição de motores de indução no sistema analisado. De modo oposto, o modelo caixa preta descreve a relação entre os valores dos sinais de entrada e de saída, sem o compromisso do significado físico na modelagem. O modelo caixa preta pode ser representado por equacionamento matemático, através de funções de transferência ou equações diferenciais, ou por técnicas de inteligência artificial, como as redes neurais artificiais (REGULSKI et al., 2015; RUDION et al., 2009).

Há duas abordagens para modelagem de cargas no domínio do tempo, uma baseada em componentes e outra em medições. Na primeira, a carga é modelada como uma superposição de cargas previamente conhecidas, sendo considerada complexa para grande quantidade de cargas. Diferentemente, na segunda não é necessário conhecer as várias componentes de carga e sim a estrutura do modelo que, uma vez corretamente parametrizado, terá um comportamento próximo ao da carga. Entretanto, medidores de grandezas elétricas deverão ser instalados nas várias barras do SEP, onde se deseja modelar as cargas. As medições obtidas previamente são utilizadas para determinar os parâmetros do modelo através da minimização do erro entre as medidas e a saída modelada (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994; LIN et al., 1993; REGULSKI et al., 2015; SIMING; OVERBYE, 2012). Uma discussão sobre estas abordagens pode ser vista em Collin e outros (2010) e um estudo envolvendo as duas abordagens pode ser visto em Chen e outros (2010).

Segundo Kakran e Chanana (2018), uma *smart grid* é uma rede inteligente, que combina tecnologia da informação com a rede elétrica do sistema de energia. Esta tecnologia permite a coleta de várias informações elétricas da rede, utilizando sensores inteligentes e sistemas rápidos de comunicação. Com o advento das *smart grids* e a crescente instalação de unidades de medição fasorial (*Phasor Measurement Units* – PMU)[4] os dados de medições da rede podem ser utilizados para modelagem de cargas (METALLINOS; TPAPADOPOULOS; CHARALAMBOUS, 2016).

Análises de regime permanente e de fluxo de potência requerem modelos estáticos, e estudos de transitórios e de estabilidade necessitam de modelos dinâmicos. No caso dos modelos estáticos pode-se citar o exponencial e o polinomial e no caso dos dinâmicos o modelo do motor de indução, o composto e o de recuperação exponencial. Modelos estáticos são amplamente difundidos para a representação de cargas em diversas análises sobre o sistema elétrico. A caracterização de cargas estáticas pode ser feita pelo modelo ZIP, que representa

[4] Atualmente, as PMUs constituem a tecnologia disponível mais avançada e acurada para a realização de medições sincronizadas no tempo. Estas unidades fornecem medições fasoriais de tensão e corrente, além da frequência. Ambas sincronizadas com alta precisão em uma referência de tempo comum, fornecida pelo sistema de posicionamento global (GPS) (TERZIJA et al., 2011). O monitoramento harmônico do sistema também pode ser realizado com as PMUs (MELO et al., 2017).

as potências ativa e reativa da carga por componentes de impedância constante, corrente constante e potência constante, considerando variações de tensão (SASIDHARAN et al., 2015), e assim fornecendo algum significado físico sobre a carga (EPRI, 2006). Este modelo é amplamente utilizado para representar cargas residenciais e industriais modernas em diversos estudos sobre o sistema elétrico de potência como em análises de estabilidade (SAMUI; SAMANTARAY, 2016), estudos de fluxo de potência e planejamento de sistemas de potência (SASIDHARAN et al., 2015), controle de tensão e reativos (FEINBERG; HU; YUAN, 2016), conservação de energia por redução de tensão (*Conservation Voltage Reduction* – CVR) (BOKHARI et al., 2014), avaliação da capacidade disponível de transferência de potência (*Available Transfer Capability* – ATC) (KUMAR; KUMAR, 2014), detecção de ilhamento para inversores de frequência utilizados na geração distribuída (SAMUI; SAMANTARAY, 2016) e determinação do local da ocorrência de faltas (HERRERA-OROZCO; MORA-FLÓREZ; PÉREZ-LONDOÑO, 2014). Em Murty e Kumar (2014) um modelo ZIP variante no tempo foi aplicado na alocação da geração distribuída num sistema de distribuição tipo malha. Um modelo ZIP quase em tempo real foi proposto em Manbachi e outros (2015) num estudo sobre CVR. Um histórico sobre a modelagem de cargas incluindo o modelo ZIP pode ser visto em Bokhari e outros (2014).

Por outro lado, modelagens que consideram componentes harmônicas de tensão e corrente são utilizadas para estimar o impacto de cargas não lineares no sistema. Entre as modelagens harmônicas de cargas pode-se citar: modelo de fonte de corrente constante, em que cada componente harmônica de corrente da carga é representada por uma fonte de corrente constante (LAMICH et al., 2017; SENRA; BOAVENTURA; MENDES, 2017); modelo de Norton, em que cada componente harmônica de corrente de carga é representada pelo circuito equivalente de Norton, contendo uma admitância em paralelo com uma fonte de corrente (CANESIN et al., 2014; JAVADI et al., 2016; KARIMZADEH; ESMAEILI; HOSSEINIAN, 2015; NASSIF; YONG; XU, 2010); modelo de Norton harmonicamente acoplado, cujo equacionamento considera uma corrente constante para cada ordem harmônica de corrente da carga e uma matriz de admitâncias responsável pelo acoplamento harmônico entre componentes de diversas ordens harmônicas de tensão e corrente da carga (FOLTING et al., 2014; NASSIF; YONG; XU, 2010; SENRA; BOAVENTURA; MENDES, 2017); e modelo de matriz de admitância harmonicamente acoplada, que contém uma matriz de admitâncias que relaciona tensões e correntes de diversas ordens harmônicas (SENRA; BOAVENTURA; MENDES, 2017; SUN et al., 2007).

Para Zhao, Li e Xia (2004) o modelo de fonte de corrente constante e o modelo de Norton não fornecem precisão suficiente para representar determinadas cargas não lineares, tais como cargas dependentes de tensão. O modelo de Norton considera a carga como uma fonte de corrente constante em paralelo com uma impedância, onde as correntes harmônicas da carga estão relacionadas apenas com as tensões harmônicas de mesma ordem, desconsiderando o acoplamento entre tensões e correntes de diferentes frequências harmônicas (BAGHERI et al., 2009). Entretanto, a exatidão dos resultados do modelo pode ser melhorada considerando o efeito de acoplamento como no caso do modelo de Norton harmonicamente acoplado (FOLTING et al., 2014).

1.3 Objetivos e Contribuições

Este trabalho tem como objetivo geral a proposição de novos modelos harmônicos para cargas agregadas não lineares do sistema elétrico, submetidas a tensões harmônicas variáveis. Além disso, são propostas as metodologias para determinação dos parâmetros destes modelos. Assim, após a estimação dos parâmetros, seguindo a metodologia apresentada, é possível determinar de forma acurada a injeção harmônica de potência ativa e reativa no barramento da carga, mediante o conhecimento de sua tensão harmônica. Nesta tese, também são discutidos estudos de caso, visando a aplicação dos modelos e métodos propostos.

A primeira proposta associa elementos amplamente utilizados na modelagem de cargas. Estes elementos são o modelo ZIP e a matriz de admitância harmonicamente acoplada. Como contribuição, diferente dos outros modelos harmônicos citados anteriormente, esta combinação associa os benefícios da caracterização de cargas pelo modelo ZIP, bem como o cruzamento de frequências dado pela matriz de admitância, necessário em cargas não lineares. O modelo ZIP provê algum conhecimento físico sobre a carga, além de flexibilidade na representação de diferentes tipos de cargas, considerando variações de tensão. Assim, o novo modelo proposto pode representar a carga num formato amplamente difundido em estudos sobre o sistema por meio das componentes de impedância constante, corrente constante e potência constante. A matriz de admitância harmonicamente acoplada promove a interação cruzada entre diversas componentes harmônicas de tensão na composição da potência e corrente da carga modelada, proporcionando a representação de cargas não lineares. Algumas características do modelo de Norton Acoplado também estão incorporadas, já que nesta proposta há uma componente de corrente constante, porém com fator de potência constante, além do acoplamento cruzado de frequências dado pela matriz de admitância.

Os parâmetros da parcela ZIP da componente fundamental do modelo são determinados por busca exaustiva, enquanto os demais parâmetros são obtidos por regressão linear múltipla. Todos os parâmetros são encontrados a partir de dados medidos de tensão e corrente da carga. Tais dados devem considerar pontos de operação distintos, abrangendo toda a faixa de valores na qual se pretende modelar o sistema. Diferente de outros trabalhos, propõe-se o uso dos coeficientes do modelo ZIP em uma faixa pré-determinada (por exemplo: 0–100%), podendo auxiliar na interpretação do tipo de carga modelada em termos das proporções de impedância constante, corrente constante e potência constante. Estudos de caso, utilizando dados reais e dados de simulação, são apresentados, mostrando os resultados desta abordagem para cargas eletrônicas. O novo modelo proposto foi capaz de representar as carga não lineares avaliadas com exatidão elevada, apesar dele conter um número inferior de parâmetros em relação ao modelo de Norton acoplado para análises que consideram mais de três ordens harmônicas.

A segunda modelagem de carga também é baseada na representação das potências ativa e reativa da carga a ser modelada por componentes de impedância constante, corrente constante e potência constante, considerando variações de tensão proposta pelo modelo ZIP (ALMEIDA et al., 2013; LEITE; MANTOVANI, 2015; SASIDHARAN et al., 2015). Como contribuição, diferente de outros modelos propostos na literatura, este representa a potência harmônica aparente da carga através de três componentes de potência: a primeira dada por uma impedância constante, a segunda dada por uma matriz de correntes harmonicamente acopladas e a terceira por potências harmônicas constantes. Conforme descrito por Lamich e outros (2017), além de tensões e correntes harmônicas, outras grandezas, como a potência, podem ser utilizadas para melhor descrever o comportamento da carga. A representação de cargas pelas componentes descritas atribui flexibilidade ao modelo, permitindo sua adequação a diferentes tipos de cargas submetidas a tensões harmônicas variáveis, sendo o mesmo aplicável em simuladores para representar cargas devido à sua estrutura baseada em circuito. A matriz de correntes harmonicamente acopladas promove o necessário acoplamento harmônico entre diferentes frequências, papel realizado por uma matriz de admitâncias em outros modelos. Este trabalho também apresenta a metodologia para determinação dos parâmetros do segundo modelo. Neste caso, o método de regressão linear múltipla é empregado, sendo a quantidade de parâmetros igual a do modelo de Norton acoplado mais uma impedância. Testes realizados em simulador e experimentalmente mostraram a exatidão elevada do modelo para diferentes tipos de cargas.

Ambos os modelos podem subsidiar diversas análises harmônicas em sistemas com a presença de várias cargas não lineares. Tais análises podem ser utilizadas para detectar cargas que contribuem significativamente para a distorção das tensões do sistema através da injeção de correntes harmônicas, bem como para a aplicação de medidas para mitigar componentes harmônicas indesejadas. A partir da avaliação dos parâmetros do modelo é possível detectar as componentes harmônicas que mais afetam uma dada componente de potência ou corrente da carga.

Neste trabalho não são realizadas comparações entre os modelos propostos e entre estes e os modelos já disponíveis na literatura, uma vez que suas características são distintas e a determinação dos seus parâmetros é dependente da metodologia empregada.

1.4 Organização do Trabalho

Este trabalho foi organizado em seis capítulos, cujos escopos estão descritos a seguir:

- Capítulo 1: contém uma introdução sobre a necessidade de utilização de modelos representativos do SEP, ressaltando a importância dos modelos de cargas na caracterização do sistema. Descreve também os objetivos e contribuições do trabalho e como ele está organizado;

- Capítulo 2: apresenta um levantamento dos modelos empregados por diversas publicações, contendo um resumo das principais modelagens de cargas adotadas em diversos estudos sobre o SEP;

- Capítulo 3: propõe um modelo para a potência aparente de cargas harmônicas considerando coeficientes do modelo polinomial, bem como o acoplamento de componentes harmônicas, empregando uma matriz de admitância. Além disso, mostra o equacionamento para a determinação de parâmetros do modelo e os resultados de sua aplicação em uma carga linear e em cargas eletrônicas;

- Capítulo 4: descreve um modelo proposto para a caracterização de cargas harmônicas através de um circuito equivalente que considera o acoplamento de componentes harmônicas, aplicando uma matriz de correntes. Bem como, exibe o equacionamento para a determinação de parâmetros do modelo e os resultados de sua aplicação em uma carga do tipo motor de indução e a combinação desta carga com cargas eletrônicas;

- Capítulo 5: relata a aplicação do modelo proposto no Capítulo 3 em uma rede radial de 25 barras. Esta rede é composta por segmentos com diferentes tamanhos e tipos de cabos, além de cargas lineares e vários tipos de cargas não lineares. A modelagem foi aplicada em um ponto da rede englobando alguns segmentos de rede e um conjunto de cargas;

- Capítulo 6: conclui o presente trabalho, destacando seus principais pontos, além de fornecer recomendações de trabalhos futuros.

No APÊNDICE A estão descritos os trabalhos publicados com base nesta pesquisa.

No APÊNDICE B é discutida a transformação de dados, utilizando diferentes métodos de normalização das variáveis de um sistema de equações.

O APÊNDICE C contém os dados do circuito e das cargas consideradas nos estudos de caso dos modelos propostos nos Capítulos 3 e 4.

O APÊNDICE D exemplifica a utilização das metodologias para a determinação dos parâmetros dos modelos propostos nos Capítulos 3 e 4.

O APÊNDICE E contém os dados da rede radial utilizada no estudo de caso do Capítulo 5.

2 MODELAGEM DE CARGAS

Segundo Byoung-Kon e outros (2006a), um modelo de carga é uma representação matemática da relação entre a tensão do barramento e a potência aparente ou a corrente que flui para a carga. Entretanto, os modelos de cargas devem ser compatíveis com a análise pretendida. Desta forma, vários modelos são propostos na literatura, sendo amplamente utilizados os modelos estáticos, geralmente aplicados em estudos de regime permanente da carga, e modelos dinâmicos, tipicamente utilizados em estudos de transitórios da carga. Porém, para considerar as componentes harmônicas da carga é necessário o uso da modelagem harmônica (BRUNORO; ENCARNAÇÃO; FARDIN, 2016a).

Este capítulo descreve os principais modelos de cargas utilizados considerando modelos estáticos, dinâmicos e harmônicos e, também, resume as técnicas empregadas por diversos trabalhos na determinação dos parâmetros do modelo considerado no estudo.

2.1 Modelo Estático e Dinâmico

Geralmente, os modelos de cargas são classificados em duas grandes categorias: modelos estáticos e modelos dinâmicos (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994). Um levantamento de vários trabalhos com modelos estáticos e dinâmicos de cargas, com resumo da representação matemática e faixa de valores dos parâmetros, pode ser visto em IEEE (1995a).

2.1.1 Modelo Estático

Modelos estáticos expressam as características da carga, em qualquer instante de tempo, em função da tensão do barramento da carga, onde a componente ativa e a reativa são consideradas separadamente. Este modelo é indicado apenas para situações onde as variações de tensão e frequência são pequenas ou lentas, em que o regime permanente é alcançado rapidamente. O modelo estático também pode ser aplicado quando o interesse está voltado somente para análises de regime permanente. Para pequenas variações de tensão, a maioria das cargas compostas[5] tem este tipo de comportamento e a modelagem estática pode ser empregada (KUMAR; KUMAR, 2014; KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994; REGULSKI et al., 2015; SIMING; OVERBYE, 2012).

O modelo estático é usualmente representado na literatura como modelo exponencial e polinomial (DÖŞOĞLU; ARSOY, 2014; KEYHANI; LU; HEYDT, 2005; KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994; MARTI; AHMADI; BASHUALDO, 2013; MILANOVIC, 1999).

2.1.1.1 Modelo Exponencial

A representação do consumo de potência ativa *P* e reativa *Q* de uma carga conectada a um barramento, em função da magnitude de sua tensão *V*, é descrita pelas Equações 1 e 2.

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^a \qquad (1)$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^b \qquad (2)$$

onde o subscrito 0 representa a condição inicial da respectiva variável. O expoente *a*, tipicamente, assume valores entre 0,5 e 1,8 e *b* entre 1,5 e 6, este último variando não linearmente com a tensão, devido a elementos saturáveis na composição da carga. Um levantamento de referências da faixa de variação dos valores dos coeficientes *a* e *b* pode ser visto em Milanovic (1999). Adicionalmente, este trabalho propõe uma alternativa de modelagem para sistemas de alta tensão contendo capacitores para correção do fator de potência.

No modelo exponencial a dependência da frequência do barramento *f* pode ser expressa como descrito pelas Equações 3 e 4.

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^a \left[1 + K_{pf} \left(f - f_0 \right) \right] \qquad (3)$$

---

[5] São cargas compostas por um grande número de dispositivos, como motores, aquecedores, refrigeradores, compressores, fornos, lâmpadas, entre outras (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994).

$$Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^b \left[1 + K_{qf} \left(f - f_0 \right) \right] \tag{4}$$

onde, geralmente, K_{pf} está entre 0 e 3 e K_{qf} está entre – 2 e 0, que são os parâmetros do modelo de sensibilidade à frequência.

Conforme descrito por Michael e outros (2014), um modelo mais genérico pode ser construído a partir da adição de várias componentes exponenciais para descrever a relação entre a tensão e a potência da carga.

2.1.1.2 Modelo Polinomial ou ZIP

A partir da formulação do modelo exponencial, pelas Equações 1 e 2, é possível representar cargas com característica de potência, corrente ou impedância constante, com expoentes iguais a 0, 1 ou 2, respectivamente. A denominação ZIP pode ser utilizada devido à composição do modelo pelas componentes de impedância (Z), corrente (I) e potência (P) constante. Esta representação é descrita pelas Equações 5 e 6 (MANBACHI et al., 2015; MARTI; AHMADI; BASHUALDO, 2013; SASIDHARAN et al., 2015).

$$P = P_0 \left[p_Z \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + p_I \left(\frac{V}{V_0} \right) + p_P \right] \tag{5}$$

$$Q = Q_0 \left[q_Z \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + q_I \left(\frac{V}{V_0} \right) + q_P \right] \tag{6}$$

onde os coeficientes p_Z, p_I e p_P definem a proporção de cada componente na caracterização da potência ativa da carga. O mesmo raciocínio pode ser aplicado aos coeficientes da potência reativa. As relações entre estes coeficientes estão descritas nas Equações 7 e 8.

$$p_Z + p_I + p_P = 1 \tag{7}$$

$$q_Z + q_I + q_P = 1 \tag{8}$$

No modelo polinomial a dependência da frequência também pode ser obtida como descrito no modelo exponencial.

A superposição dos modelos ZIP e exponencial pode ser usada para melhorar a caracterização de cargas compostas (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994). Em Mota e Mota (2004) a modelagem de carga de subestações do sistema de distribuição de energia elétrica é efetuada usando o modelo exponencial e ZIP (ou polinomial) com estimativa dinâmica dos seus parâmetros pelo método dos mínimos quadrados ponderados na forma recursiva. Já em Feinberg, Hu e Yuan (2016) é tratado um importante problema de otimização em *smart grids*, propondo um algoritmo para o controle da tensão e da potência reativa em sistemas de distribuição em que a carga é representada pelo modelo ZIP, cujos parâmetros foram selecionados com base em dados de cargas urbanas. Valores dos coeficientes do modelo ZIP para diversas cargas são apresentados em Bokhari e outros (2014) e em Manbachi e outros (2015).

2.1.2 Modelo Dinâmico

O modelo dinâmico é necessário onde o transitório da carga é importante para o estudo do sistema em questão. O modelo dinâmico é capaz de representar a resposta transitória da carga, permitindo a realização de estudos de estabilidade de sistemas. Análises de sistemas com grande quantidade de motores elétricos requerem este tipo de representação (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994).

A determinação dos parâmetros de modelos dinâmicos é um problema não linear e pode ser resolvido utilizando técnicas de estimação não linear e de inteligência artificial (REGULSKI et al., 2015; SIMING; OVERBYE, 2012; TERZIJA et al., 2011). No SEP são utilizados métodos de identificação de modelos de sistemas dinâmicos no domínio da frequência e do tempo. Porém, este último é o método mais empregado (SIMING; OVERBYE, 2012). Sugestões para escolha de modelos de cargas, nas simulações de fluxo de potência e de transitórios, são apresentadas em IEEE (1995b).

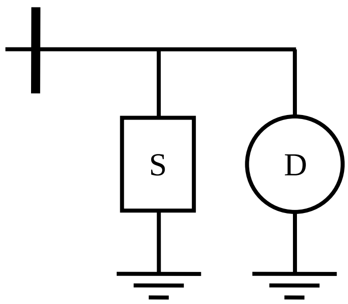
2.1.2.1 Modelo do Motor de Indução

O motor de indução pode ser utilizado para caracterizar cargas compostas conectadas às barras de um sistema. Isto se deve ao fato do motor de indução ser uma carga muito utilizada em sistemas elétricos típicos, determinando a dinâmica do sistema. Assim, é razoável que esta dinâmica seja representada pelo modelo de um motor de indução adequadamente parametrizado (RUDION et al., 2009). Vários modelos dinâmicos baseados em motores de indução são apresentados em Lesieutre, Sauer e Pai (1995).

2.1.2.2 Modelo Composto

O modelo composto é capaz de caracterizar cargas agregadas, com grande diversidade de componentes de carga. Sua denominação se justifica, pois este modelo é formado pela combinação de modelos estáticos e dinâmicos (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994). Segundo Regulski e outros (2015), o modelo composto, cuja estrutura é mostrada na Figura 1, pode ser representado por uma carga descrita pelo modelo estático (S), por exemplo, tipo exponencial ou polinomial, em paralelo com a parte dinâmica da carga (D), como um motor de indução. Este modelo vem sendo amplamente utilizado para descrever o comportamento de cargas, especialmente em estudos de estabilidade de sistemas (NAJAFABADI; ALOUANI, 2012).

Figura 1 – Estrutura do modelo composto.



Fonte: Adaptada de Najafabadi e Alouani (2012).

2.1.2.3 Modelo de Recuperação Exponencial

O modelo de recuperação exponencial é amplamente utilizado para descrever o comportamento dinâmico não linear de cargas agregadas. Desta forma, é possível representar a resposta das potências ativa e reativa da carga, mediante variações de tensão ao longo do tempo (BYOUNG-KON et al., 2006a; KNYAZKIN; CANIZARES; SODER, 2004; YANG et al., 2013). Um grande problema enfrentado pelos operadores de sistema durante um distúrbio é a recuperação de carga, que aumenta o consumo de reativos e provoca a redução da tensão no sistema de transmissão. Terzija e outros (2011) exemplificam o comportamento de recuperação da potência da carga durante a mudança de *tap* de um transformador. Em Byoung-Kon e outros (2006a) o modelo de recuperação exponencial é aplicado no estudo de caso de uma subestação que fornece energia para consumidores industriais. Em um caso analisado neste estudo, foi apresentado o comportamento da potência ativa e reativa da carga após uma redução de 16,5% em sua tensão. Pode ser observado no trabalho que o transitório da tensão e das potências ocorreu por, aproximadamente, 1 segundo.

É possível expressar matematicamente, em função da tensão da carga V, a demanda de potência ativa P_d e reativa Q_d pelas Equações de 9 a 12.

$$T_p \frac{dP_r(t)}{dt} = -P_r(t) + P_0\left[\frac{V(t)}{V_0}\right]^{N_{ps}} - P_0\left[\frac{V(t)}{V_0}\right]^{N_{pt}} \tag{9}$$

$$P_d(t) = P_r(t) + P_0\left[\frac{V(t)}{V_0}\right]^{N_{pt}} \tag{10}$$

$$T_q \frac{dQ_r(t)}{dt} = -Q_r(t) + Q_0\left[\frac{V(t)}{V_0}\right]^{N_{qs}} - Q_0\left[\frac{V(t)}{V_0}\right]^{N_{qt}} \tag{11}$$

$$Q_d(t) = Q_r(t) + Q_0\left[\frac{V(t)}{V_0}\right]^{N_{qt}} \tag{12}$$

onde T_p e T_q são as constantes de tempo de recuperação de carga; P_r e Q_r são as potências ativa e reativa de recuperação da carga, respectivamente; P_0, Q_0 e V_0 são, respectivamente, os valores iniciais de potência ativa, reativa e tensão da carga, antes da modificação do valor da tensão; e N_{pt} e N_{qt}, representam a dependência exponencial da tensão da carga para transitórios, enquanto N_{ps} e N_{qs}, representam a mesma variação para regimes permanentes. Em Byoung-Kon e outros (2006a) os autores mostram que modelos de recuperação exponencial linearizados fornecem excelentes resultados. Outras simplificações deste modelo podem ser vistas em Keyhani, Lu e Heydt (2005) e Knyazkin, Canizares e Soder (2004).

2.2 Modelagem Harmônica

Com a presença cada vez maior de cargas não lineares conectadas ao SEP, a modelagem que considere componentes harmônicas torna-se imprescindível para estimar o impacto das cargas atuais ou de novos clientes no sistema, bem como para investigar a efetividade de técnicas para mitigar harmônicas. Neste caso, é indispensável a caracterização do comportamento harmônico de cargas em estudos sobre perdas e sobre as componentes harmônicas de tensão e corrente. As principais modelagens harmônicas de cargas estão apresentadas a seguir (ALMEIDA; KAGAN, 2011; BALCI et al., 2008; FAURI, 1997; NASSIF, 2009; SUN et al., 2007). Uma comparação entre modelos pode ser vista em Koch e outros (2013).

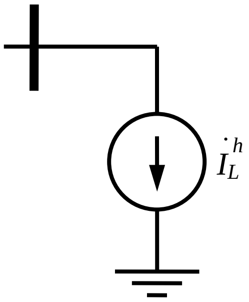
Quando uma carga linear é submetida a uma tensão harmônica ela absorverá somente a corrente harmônica de mesma ordem. Ao contrário, cargas não lineares podem absorver correntes com diferentes ordens harmônicas em relação à tensão aplicada (FAURI, 1997). Assim, modelos que consideram o efeito de diversas componentes harmônicas de tensão numa dada componente harmônica de corrente são mais acurados dependendo do tipo de carga a ser representada (FOLTING et al., 2014; SENRA; BOAVENTURA; MENDES, 2017). Mansoor e outros (1995) descrevem a injeção de correntes harmônicas no sistema, provocada por vários retificadores monofásicos de onda completa à diodo com filtro capacitivo. Com a injeção harmônica ocorre a distorção da tensão aplicada nestes retificadores, devido à impedância equivalente da rede. O artigo mostra que esta tensão distorcida afeta o comportamento harmônico das correntes das cargas não lineares avaliadas.

Cabe ressaltar que a modelagem harmônica é utilizada para representar o comportamento da carga em regime permanente, e não a sua dinâmica.

2.2.1 Modelo de Fonte de Corrente Constante

Neste modelo cada componente harmônica de ordem h da corrente de carga é representada por uma fonte de corrente constante, como pode ser visto na Figura 2, onde $\dot{I}_L^h$ é a componente harmônica de corrente de ordem h. O $\cdot$ indica que o valor é fasorial. Porém, uma limitação desta modelagem é que ela é indicada apenas para cargas com pouca dependência da tensão e para sistemas com reduzidas variações de tensão. Este modelo sugere que as correntes da carga são independentes de suas tensões, consequentemente desconsiderando a interação harmônica entre diferentes frequências de tensão e corrente. Tal fato pode provocar erros na modelagem de determinadas cargas (SENRA; BOAVENTURA; MENDES, 2017).

Figura 2 – Estrutura do modelo de fonte de corrente constante.

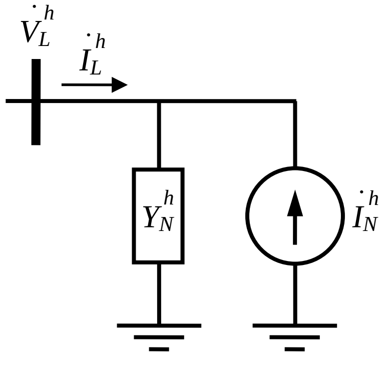


Fonte: Adaptada de Balci e outros (2008).

2.2.2 Modelo de Norton

No modelo de Norton cada componente harmônica da corrente de carga é representada pelo circuito equivalente de Norton, contendo uma admitância em paralelo com uma fonte de corrente. A representação deste modelo para cada ordem harmônica h pode ser vista na Figura 3, onde Y_N^h é uma admitância submetida à componente harmônica da tensão, de ordem h, e $\dot{I}_N^h$ é a componente harmônica de corrente, de ordem h, da fonte.

Figura 3 – Estrutura do modelo de Norton.



Fonte: Adaptada de Balci e outros (2008).

No modelo de Norton, cada componente harmônica de corrente está relacionada apenas com a componente harmônica da tensão de mesma ordem. Este modelo pode representar melhor a carga, se comparado como modelo de fonte de corrente constante, uma vez que variações da tensão agora podem ser percebidas. Porém, as correntes harmônicas da carga estão relacionadas apenas às suas tensões harmônicas de mesma ordem (BAGHERI et al., 2009; KOCH et al., 2013). As componentes harmônicas da corrente de carga, até a ordem *N*, para este modelo, estão descritas na Equação 13. Os parâmetros que devem ser estimados neste modelo são as correntes $\dot{I}_N^h$ e as admitâncias Y_N^h, para *h* assumindo valores inteiros entre 1 e *N*.

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_L^1 \\ \dot{I}_L^2 \\ \dot{I}_L^3 \\ \vdots \\ \dot{I}_L^N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_N^1 \\ \dot{I}_N^2 \\ \dot{I}_N^3 \\ \vdots \\ \dot{I}_N^N \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Y_N^1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & Y_N^2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & Y_N^3 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & Y_N^N \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_L^1 \\ \dot{V}_L^2 \\ \dot{V}_L^3 \\ \vdots \\ \dot{V}_L^N \end{bmatrix} \tag{13}$$

onde $\dot{I}_L^h$ e $\dot{V}_L^h$ são as componentes harmônicas, de ordem *h*, da corrente e da tensão na carga, respectivamente; $\dot{I}_N^h$ é a componente harmônica, de ordem *h*, da corrente da fonte de corrente; e Y_N^h é a admitância submetida à componente harmônica da tensão de ordem *h*.

A partir da Equação 13 é possível obter as correntes harmônicas da carga modelada, mediante o conhecimento das tensões harmônicas sobre a mesma.

2.2.3 Modelo de Matriz de Admitância Harmonicamente Acoplada

Este modelo leva em consideração que cada componente harmônica da corrente da carga é dependente das várias componentes harmônicas de tensão, sendo a relação entre correntes e tensões caracterizada por admitâncias (BALCI et al., 2008; FAURI, 1997; SENRA; BOAVENTURA; MENDES, 2017; SUN et al., 2007). As componentes harmônicas da corrente na carga, até a ordem *N*, estão descritas na Equação 14.

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_L^1 \\ \dot{I}_L^2 \\ \dot{I}_L^3 \\ \vdots \\ \dot{I}_L^N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1^1 & Y_1^2 & Y_1^3 & \cdots & Y_1^N \\ Y_2^1 & Y_2^2 & Y_2^3 & \cdots & Y_2^N \\ Y_3^1 & Y_3^2 & Y_3^3 & \cdots & Y_3^N \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_N^1 & Y_N^2 & Y_N^3 & \cdots & Y_N^N \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_L^1 \\ \dot{V}_L^2 \\ \dot{V}_L^3 \\ \vdots \\ \dot{V}_L^N \end{bmatrix} \tag{14}$$

onde Y_h^v é a admitância submetida à componente harmônica da tensão de ordem *v*, utilizada na determinação da componente harmônica de ordem *h*, da corrente na carga.

2.2.4 Modelo de Norton Harmonicamente Acoplado

Enquanto o modelo Norton clássico despreza o acoplamento entre diferentes frequências harmônicas da tensão e da corrente na carga, este modelo promove este acoplamento utilizando uma matriz de admitância. Porém, desconsiderar tal interação entre frequências pode levar a erros significativos na modelagem do comportamento da carga (FOLTING et al., 2014; KOCH et al., 2013; RIBEIRO, 2009). Este modelo é baseado no modelo de Norton, entretanto a construção da matriz de admitâncias considera que cada componente harmônica de corrente da carga pode ser afetada pelas várias componentes harmônicas da tensão na carga (YUANYUAN et al., 2007). No modelo de Norton harmonicamente acoplado as componentes harmônicas da corrente na carga, até a ordem *N*, são representadas pela Equação 15.

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_L^1 \\ \dot{I}_L^2 \\ \dot{I}_L^3 \\ \vdots \\ \dot{I}_L^N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_N^1 \\ \dot{I}_N^2 \\ \dot{I}_N^3 \\ \vdots \\ \dot{I}_N^N \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Y_{N,1}^1 & Y_{N,1}^2 & Y_{N,1}^3 & \cdots & Y_{N,1}^N \\ Y_{N,2}^1 & Y_{N,2}^2 & Y_{N,2}^3 & \cdots & Y_{N,2}^N \\ Y_{N,3}^1 & Y_{N,3}^2 & Y_{N,3}^3 & \cdots & Y_{N,3}^N \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{N,N}^1 & Y_{N,N}^2 & Y_{N,N}^3 & \cdots & Y_{N,N}^N \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_L^1 \\ \dot{V}_L^2 \\ \dot{V}_L^3 \\ \vdots \\ \dot{V}_L^N \end{bmatrix} \tag{15}$$

onde $\dot{I}_N^h$ é a componente harmônica de corrente, de ordem *h*, da fonte de corrente; e $Y_{N,h}^v$ é a admitância submetida à componente harmônica da tensão de ordem *v*, utilizada na determinação da componente harmônica de ordem *h*, da corrente na carga.

Em situação onde o modelo de Norton harmonicamente acoplado não fornece a exatidão requerida, novos graus de liberdade podem ser incorporados adicionando-se outra matriz de admitâncias. Porém, estas novas admitâncias estarão submetidas ao conjugado complexo das componentes harmônicas de tensão da carga. Segundo Nassif, A. B., Yong e Xu (2010), esta representação é denominada *full model*. Tal representação é descrita pela Equação 16.

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_L^1 \\ \dot{I}_L^2 \\ \dot{I}_L^3 \\ \vdots \\ \dot{I}_L^N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_N^1 \\ \dot{I}_N^2 \\ \dot{I}_N^3 \\ \vdots \\ \dot{I}_N^N \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Y_{N,1}^1 & Y_{N,1}^2 & Y_{N,1}^3 & \cdots & Y_{N,1}^N \\ Y_{N,2}^1 & Y_{N,2}^2 & Y_{N,2}^3 & \cdots & Y_{N,2}^N \\ Y_{N,3}^1 & Y_{N,3}^2 & Y_{N,3}^3 & \cdots & Y_{N,3}^N \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{N,N}^1 & Y_{N,N}^2 & Y_{N,N}^3 & \cdots & Y_{N,N}^N \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_L^1 \\ \dot{V}_L^2 \\ \dot{V}_L^3 \\ \vdots \\ \dot{V}_L^N \end{bmatrix} + \\ + \begin{bmatrix} Y'^1_{N,1} & Y'^2_{N,1} & Y'^3_{N,1} & \cdots & Y'^N_{N,1} \\ Y'^1_{N,2} & Y'^2_{N,2} & Y'^3_{N,2} & \cdots & Y'^N_{N,2} \\ Y'^1_{N,3} & Y'^2_{N,3} & Y'^3_{N,3} & \cdots & Y'^N_{N,3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y'^1_{N,N} & Y'^2_{N,N} & Y'^3_{N,N} & \cdots & Y'^N_{N,N} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_L^{1^*} \\ \dot{V}_L^{2^*} \\ \dot{V}_L^{3^*} \\ \vdots \\ \dot{V}_L^{N^*} \end{bmatrix} \tag{16}$$

onde $\dot{V}_L^{h^*}$ é o conjugado complexo da componente harmônica, de ordem *h*, da tensão na carga; e $Y'^v_{N,h}$ é a admitância submetida ao conjugado complexo da componente harmônica da tensão de ordem *v*, utilizada na determinação da componente harmônica de ordem *h*, da corrente na carga.

2.3 Determinação de Parâmetros dos Modelos

Existem diferentes tipos de modelos de cargas e de métodos para determinar seus parâmetros. Na abordagem baseada em medições, indicada para situações onde a estrutura do modelo é conhecida, podem ser usadas técnicas como estratégias evolutivas, inteligência artificial e método dos mínimos quadrados. Como a maioria dos modelos dinâmicos são não lineares, a desafiadora tarefa de estimar seus parâmetros pode ser obtida com o auxílio do método dos mínimos quadrados não linear. Algoritmos genéticos e otimização por enxame de partículas também são utilizados na parametrização dos modelos. Combinações de algoritmos genéticos ou otimização por enxame de partículas com mínimos quadrados são aplicadas, com as melhores características destes métodos (REGULSKI et al., 2015).

Modelos baseados em redes neurais artificiais podem representar cargas não lineares, onde diferentes estruturas de redes neurais artificiais estão disponíveis. Algumas desvantagens das redes neurais artificiais básicas são discutidas em Chang e Cheng (2010).

Técnicas de identificação de sistemas, onde respostas aos distúrbios, juntamente com conhecimentos prévios no sistema, podem ser utilizadas para determinar o modelo dinâmico da carga (SIMING; OVERBYE, 2012). As perturbações necessárias à identificação dos seus parâmetros podem ocorrer naturalmente ou serem provocadas artificialmente, afetando o sistema de modo que as grandezas relevantes sejam medidas (RUDION et al., 2009). Circunstâncias práticas para provocar distúrbios são apresentadas em Bagheri e outros (2009), como chaveamento de capacitores, mudança de *tap* de transformador, variação de carga e injeção de corrente. É importante que os dados coletados do sistema contenham informações sobre as características que se pretende modelar. Por exemplo, somente com dados de regime permanente não é possível modelar características transitórias do sistema (SIMING; OVERBYE, 2012). Arefifar e Xu (2013) apresentam um método para a determinação dos parâmetros do modelo dinâmico de cargas dependentes da tensão. Este artigo propõe o uso dos distúrbios causados pelo chaveamento automático do *tap* de transformadores para a contínua atualização dos parâmetros do modelo.

Um resumo, considerando diversos trabalhos, expondo a modelagem de carga adotada, seus métodos de estimação de parâmetros e aplicações em que os modelos foram empregados, está descrito no Quadro 1. As siglas empregadas neste resumo são apresentadas no Quadro 2 (BRUNORO; ENCARNAÇÃO; FARDIN, 2016a).

2.4 Conclusão

Este capítulo apresentou diversas abordagens para a modelagem de cargas do sistema elétrico, cuja escolha deve ser adequada ao estudo desejado e à exatidão requerida pela análise. Além disso, relacionou modelos de cargas e métodos para a determinação de parâmetros de vários trabalhos. A partir deste estudo foram elaboradas propostas de modelos de cargas que consideram as componentes harmônicas presentes na tensão e na corrente do sistema. Estas propostas de modelos são descritas nos Capítulos 3 e 4.

A revisão bibliográfica realizada neste capítulo mostrou que os modelos de cargas harmônicas que utilizam cruzamento entre diversas frequências obtêm maior exatidão em relação aos modelos que não promovem tal acoplamento. Além disso, as técnicas para a determinação de

Quadro 1 – Resumo de trabalhos com modelagem de cargas.

Referência	**Modelo**	**Método**	**Aplicação**
(COLLIN et al., 2010)	*Component-based*	*Typical values*	Análise de regime permanente
(MARTI; AHMADI; BASHUALDO, 2013)	*ZI*	*LR*	
(MILANOVIC, 1999)	*EL*	---	
(MICHAEL et al., 2014)	*ZIP*	*AM*	
(AREE, 2014)	*CL(EL+IM)*	*Newton-Raphson*	
(RUDION et al., 2009)	*CL(ZIP+IM)*	*Nonlinear LSM*	Análise de transitórios
(REGULSKI et al., 2015)	*CL(EL+IM)*	*Nonlinear LSM, Improved PSO, GA*	
(LIN et al., 1993)	1^{st}, 2^{nd} *and* 3^{rd} *order TF*	*LSM*	
(SIMING; OVERBYE, 2012)	*CL*	*CaR, StC*	
(CHEN et al., 2010)	*CL(ZIP+IM) based*	*ACS*	
(DÖŞOĞLU; ARSOY, 2014)	*EL, ZIP, CL(EL/ZIP+IM)*	*Typical values*	
(BYOUNG-KON et al., 2006a)	*ERL, AL, Linearized ERL,* 1^{st} *order IM*	*Nonlinear LSM*	
(KEYHANI; LU; HEYDT, 2005)	*ANN based CL*	*Two-layer ANN*	
(KNYAZKIN; CANIZARES; SODER, 2004)	*ERL, Linearized ERL*	*Adaptive SA*	
(JU et al., 2011)	*CL(ZIP+IM)*	*ACS*	
(JIN et al., 2007)	*CL(ZIP+IM)*	*GA*	
(KARLSSON; HILL, 1994)	*ERL*	*LSM*	
(KIM; KIM, 2012; MAITRA et al., 2008)	*CL(ZIP+IM)*	*Nonlinear LSM*	
(BYOUNG-KON et al., 2006b)	*CL(ZIP/EL+IM)*	*Nonlinear LSM*	
(MAITRA et al., 2006)	*CL(ZIP/EL+IM/DE)*	*Nonlinear LSM*	
(GUO et al., 2012)	*ERL*	*Nonlinear LSM*	
(MIRANIAN; ROUZBEHI, 2013)	*ANN based ERL*	*Neuro-fuzzy*	
(OONSIVILAI; EL-HAWARY, 1999)	*ANN*	*Adaptive Neuro-fuzzy*	
(NAJAFABADI; ALOUANI, 2012)	*CL(EL/ZIP+IM)*	*Extended KF*	
(YANG et al., 2013)	*ERL*	*Alternating LSM*	
(KEYHANI; WENZHE; HEYDT, 2004)	*ANN based CL*	*Recurrent ANN*	
(ZHENSHU; LINCHUAN; LI, 2009)	*SVM*	*Nonlinear Regression*	
(DEESE; NWANKPA, 2013)	*Dynamic ZIP*	*Jacobi optimization*	
(LI et al., 2011)	*CL(Z constant+IM)*	*GA*	
(BALCI et al., 2008)	*CS, N, CFAM*	*AM*	Análise harmônica
(ALMEIDA; KAGAN, 2011)	*CS, N, HCN*	*LSM*	
(KOCH et al., 2013)	*CS, N, HCN*	*AM*	
(YUANYUAN et al., 2007)	*Full HCN*	*AM*	
(NASSIF; YONG; XU, 2010)	*N, HCN, Full HCN*	*LSM*	
(FOLTING et al., 2014)	*HNC*	*AM*	
(BAGHERI et al., 2009; ZHAO; LI; XIA, 2004)	*N based*	*LSM*	
(CANESIN et al., 2014; GHORBANI et al., 2011; RYLANDER; GRADY 2010)	*N*	*AM*	
(CHANG, 2012; CHANG; CHENG, 2010)	*ANN*	*RBFNN and LUT*	
(ALKANDARI; ALDUAIJ, 2015)	10^{th} *order TF*	*LSM*	
(PALMER; LEDWICH, 1993)	*ARX*	*LSM*	
(FUENTES et al., 2000)	*CFAM*	*AM*	
(ROMERO et al., 2008)	*CL Harmonic Fuzzy*	*Nonlinear programming*	
(AL-KANDARI; EL-NAGGAR, 2006; GUNDA; KUMAR; SARMA, 2012)	*Harmonic Admittance*	*KF*	
(LAMICH et al., 2014)	*Amplitude/Phase ANN*	*ANN*	
(QUN et al., 2012)	*ANN*	*BP and LUT*	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 2 – Siglas para modelos de cargas e métodos para determinação de parâmetros.

ACS – Ant Colony Search (algoritmo de colônia de formigas)
AL – Adaptive Load Model (modelo de carga adaptativo)
AM – Algebraic Method (método algébrico)
ANN – Artificial Neural Network (rede neural artificial)
ARX – Autoregressive Exogenous (autorregressivo exógeno)
BP – Back Propagation Network (rede de retropropagação)
CaR – Compare and Resimulate (compare e simule novamente)
CFAM – Crossed Frequency Admittance Matrix (matriz de admitância de frequência cruzada)
CL – Composed Load Model (modelo de carga composta)
CS – Current Source Model (modelo de fonte de corrente)
DE – Difference Equation Model (modelo de equação de diferença)
EL – Exponential Load Model (modelo de carga exponencial)
ERL – Exponential Recovery Load Model (modelo de carga de recuperação exponencial)
GA – Genetic Algorithm (algoritmo genético)
HCN – Harmonic Coupled Norton Model (modelo de Norton harmonicamente acoplado)
IM – Induction Motor Model (modelo de motor de indução)
KF – Kalman filter (filtro de Kalman)
LR – Linear Regression (regressão linear)
LSM – Least Square Method (método dos mínimos quadrados)
LUT – Look-up Table (tabela de consulta)
N – Norton Model (modelo de Norton)
PSO – Particle Swarm Optimization (otimização por enxame de partículas)
RBFNN – Radial Basis Function ANN (rede neural de função de base radial)
SA – Simulated Annealing (recozimento simulado)
StC – Simulate then Calculate (simule então calcule)
SVM – Support Vector Machine (máquina de vetor de suporte)
TF – Transfer Function (função de transferência)
ZIP/ZI – Polynomial Model (modelo polinomial)

Fonte: Elaborado pelo autor.

parâmetros dos modelos, utilizando a abordagem baseada em medições, são amplamente difundidas. Porém, os dados empregados no processo de identificação dos parâmetros devem abranger toda a faixa de operação que se pretende modelar.

3 PROPOSTA DE MODELO CONSIDERANDO COEFICIENTES ZIP E ACOPLAMENTO HARMÔNICO POR MATRIZ DE ADMITÂNCIA

Um modelo amplamente utilizado e denominado modelo polinomial ou ZIP, descrito pelas Equações 5 e 6, representa satisfatoriamente cargas para diversos estudos de regime permanente e de transitórios. Porém, neste último caso, o modelo ZIP deve ser combinado com modelos que representem a parte dinâmica da carga (KIM; KIM, 2012; NAJAFABADI; ALOUANI, 2012). Além disso, de acordo com Bagheri e outros (2009), o modelo ZIP não é capaz de considerar os efeitos harmônicos na representação da carga. Já Ndiay e outros (2007) mostra que, para o caso em que a carga assume uma Distorção Harmônica Total de Tensão[6] ($DTT\%$) inferior a 10%, é possível representar esta carga, de forma simplificada, como fontes de corrente sincronizadas e dependentes das componentes harmônicas da tensão da carga, baseando-se no modelo ZIP. Segundo ANEEL (2017), a $DTT\%$ pode ser determinada pela Equação 17 e a distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3 pode ser obtida pela Equação 18.

$$DTT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{N} V_h^2}}{V_1} \cdot 100 \tag{17}$$

onde h é a ordem harmônica que assume valores inteiros de 2 até N; N é a maior ordem harmônica considerada; V_1 é a magnitude da tensão eficaz da componente fundamental; e V_h é a magnitude da tensão eficaz da componente harmônica de ordem h.

$$DTT_I\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=5}^{hi} V_h^2}}{V_1} \cdot 100 \tag{18}$$

onde h são as ordens harmônicas ímpares, não múltiplas de 3; e hi é a máxima ordem harmônica ímpar, não múltipla de 3.

Por outro lado, algumas abordagens para modelagem de cargas consideram o uso de uma matriz de admitâncias, como ocorre no modelo de Norton, descrito pela Equação 13. Neste

[6] “As distorções harmônicas são fenômenos associados a deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental (ANEEL, 2017)”.

caso, cada componente harmônica da corrente de carga é dependente da componente harmônica da tensão da carga de mesma ordem. Entretanto, no modelo de matriz de admitância harmonicamente acoplada, descrito pela Equação 14, e no modelo de Norton harmonicamente acoplado, caracterizado pela Equação 15, há dependência das componentes harmônicas da tensão da carga de várias ordens em cada componente harmônica de corrente da carga. Isto melhora a representação da carga em relação ao modelo de Norton (KOCH et al., 2013).

Neste contexto, este capítulo propõe uma modelagem que considera o acoplamento harmônico entre grandezas elétricas presentes na carga, apresentando também a metodologia para a identificação dos parâmetros do modelo (BRUNORO; ENCARNAÇÃO; FARDIN, 2016b; BRUNORO; ENCARNAÇÃO; FARDIN, 2017).

3.1 Modelo Proposto

O modelo proposto foi concebido baseado no atendimento aos seguintes requisitos:

- Utilizar modelo ZIP em cargas harmônicas, possibilitando sua caracterização física;
- Considerar variações de tensão das diversas componentes harmônicas sobre a carga;
- Promover o acoplamento harmônico entre diversas componentes de tensão em uma determinada componente de corrente da carga;
- Utilizar variáveis de entrada linearmente independentes;
- Conter uma quantidade de parâmetros similar a de outros modelos harmonicamente acoplados;
- Permitir estudos que revelam as componentes harmônicas de tensão que afetam uma determinada componente de corrente da carga.

Considerando que a abordagem com a carga ZIP não representa com exatidão uma carga submetida a componentes harmônicas de tensão, propõe-se, alternativamente, que as potências ativa e reativa da carga sejam caracterizadas pela combinação do modelo ZIP com o uso da matriz de admitância harmonicamente acoplada, proporcionando o efeito do acoplamento harmônico. Desta forma, a representação por fase de cada componente harmônica de ordem *h* da potência aparente da carga é definida pela Equação 19.

$$S_{Lh} = S_h + \Delta S_h \tag{19}$$

onde a parte real e imaginária da potência aparente S_h são obtidas a partir das Equações 5 e 6, as quais foram reescritas nas Equações 20 e 21, respectivamente; e ΔS_h, até a ordem *N*, é descrita pela Equação 22.

$$P_h = P_{0h}\left[p_Z \overline{V}_h^{\,2} + p_I \overline{V}_h + p_P\right] \tag{20}$$

$$Q_h = Q_{0h}\left[q_Z \overline{V}_h^{\,2} + q_I \overline{V}_h + q_P\right] \tag{21}$$

$$\Delta S_h = \sum_{v=1}^{N} |V_v|^2 Y_h^v \text{, com } v \neq h \tag{22}$$

onde $\overline{V}_h$ é definido pela Equação 23; as relações entre os coeficientes ZIP são descritas pelas Equações 24 e 25; e a admitância Y_h^v, decomposta em parte real e imaginária, é descrita pela Equação 26.

$$\overline{V}_h = \frac{|V_h|}{|V_{0h}|} \tag{23}$$

$$p_Z + p_I + p_P = 1 \tag{24}$$

$$q_Z + q_I + q_P = 1 \tag{25}$$

$$Y_h^v = G_h^v + jB_h^v \tag{26}$$

onde G_h^v é uma condutância e B_h^v uma susceptância submetidas à componente harmônica da tensão, de ordem *v*, utilizadas para determinar ΔS de ordem *h*.

Nesta proposta os coeficientes p_Z, p_I, p_P, q_Z, q_I e q_P do modelo ZIP são obtidos para *h* igual a 1, ou seja, a partir dos dados da componente fundamental da corrente e da tensão da carga. Estes coeficientes também são utilizados na determinação das demais ordens harmônicas. Para cada componente harmônica *h* são estimados os valores de P_{0h} e Q_{0h}, bem como os diversos valores de Y_h^v. Mediante a escolha da medida que será usada como valor inicial, consequentemente o valor inicial da potência aparente também pode ser estabelecido. No entanto, optou-se por estimar este valor inicial de potência para aumentar a exatidão do modelo, devido a presença de ruídos nas medidas de tensão e corrente utilizadas para determinar tal potência.

Os valores de V_{0h} devem ser estabelecidos como uma das medidas da tensão da carga V_h utilizada no processo de estimação dos parâmetros do modelo. Neste caso, foi adotada a primeira medida do conjunto de dados do processo de estimação, conforme sugerido por Kumar e Kumar (2014) e por Milanovic (1999). Observando as Equações 20, 21 e 23, nota-se que as magnitudes das diversas componentes harmônicas da tensão inicial V_{0h} não podem ser iguais a zero. Assim, devem ser excluídas do modelo as ordens harmônicas cujas magnitudes de tensão sejam nulas ou próximas deste valor. Para o caso em que há simetria nas tensões e correntes da carga, em que suas componentes harmônicas de ordem par são iguais a zero, o modelo da carga poderá representar suas características apenas com as componentes de ordem ímpar. Em situações em que as componentes harmônicas de ordens múltiplas de três são muito próximas de zero, estas componentes também devem ser excluídas do modelo. Quando aplicável, a eliminação das componentes harmônicas citadas não comprometem significativamente a resposta do modelo proposto e é vantajosa, pois implica na redução da quantidade de parâmetros. Consequentemente, o número de pontos necessários ao processo de identificação também será menor.

3.2 Determinação de Parâmetros do Modelo

Para realizar a identificação dos parâmetros do modelo, proposto neste capítulo, aplicou-se a minimização do erro quadrático entre os valores medidos e os valores estimados pelo modelo. Trata-se de um método que emprega a abordagem baseada em medições, aplicável quando se conhece a estrutura do modelo, o qual é amplamente utilizado em diversos trabalhos, como apresentado no Quadro 1. Neste método, os valores medidos devem abranger toda a faixa de valores na qual se pretende modelar o sistema. Neste caso, é necessário que o sistema receba distúrbios que podem ocorrer naturalmente ou podem ser provocados artificialmente como, por exemplo, alterações de carga, mudanças de *tap* de transformador (BAGHERI et al., 2009). Em um sistema de distribuição, as variações de tensão provocam alterações nas correntes das cargas, que por sua vez modificam a queda de tensão nos condutores, implicando novamente na mudança da tensão da carga.

Requisitos de medição devem ser observados para que não ocorram problemas de dados na identificação dos parâmetros do modelo. Entre eles pode-se citar: conjunto de medições que represente diferentes condições de operação, envolvendo as situações que se pretende modelar e garantindo que o sistema de equações seja linearmente independente; independência linear entre as componentes harmônicas de tensões para existir somente um conjunto de parâmetros; número de medições superior à quantidade de parâmetros a serem determinados; e amplitude das componentes harmônicas de tensão suficientemente elevada para permitir a medição e baixa o bastante para evitar problemas devido a não linearidades (ALMEIDA; KAGAN, 2011; FOLTING et al., 2014).

Medidores de qualidade de energia podem ser utilizados para determinar as medições para o processo de estimação e validação do modelo. No entanto, o medidor deve ser capaz de fornecer os valores de magnitude e ângulo das componentes harmônicas de tensão e corrente da carga a ser modelada, até a maior ordem harmônica considerada no modelo. Desta forma, é possível calcular a potência aparente na carga para cada ordem harmônica h, como descrito pela Equação 27.

$$S_{Lh} = P_{Lh} + jQ_{Lh} = V_h \cdot I_h^* \tag{27}$$

onde P_{Lh} e Q_{Lh} são as potências ativa e reativa da carga, respectivamente; e V_h e I_h são os fasores de tensão e corrente da carga respectivamente, para a ordem harmônica h.

Visando a aplicação do método dos mínimos quadrados, para identificação dos parâmetros do modelo, é necessário que o sistema de equações seja sobredeterminado para obter uma resposta representativa na presença de ruídos nas medições. Além disso, é necessário que as colunas da matriz de observação sejam linearmente independentes, ou seja, esta matriz deve ter posto pleno de colunas. Assim, o problema numérico de inversão matricial será numericamente melhor condicionado (AGUIRRE, 2007). Portanto, a quantidade de amostras do processo de estimação dos parâmetros deve ser maior do que a quantidade de parâmetros estimados. Assim, a quantidade M de medidas deve ser maior do que a quantidade de componentes harmônicas consideradas no modelo.

A determinação da quantidade mínima de amostras, consideradas no modelo, será exemplificada para duas situações em que há componentes a serem excluídas, devido à reduzida magnitude de suas tensões. A primeira situação é para o caso em que as componentes de ordem par devem ser excluídas, restando apenas as componentes de ordem ímpar. Assim, a quantidade de medidas M que deve ser coletada para a construção do sistema de equações deve atender a relação $M > M_{odd}$, com M_{odd} definido pela Equação 28. A segunda situação é para o caso em que as componentes pares e múltiplas de três são desconsideradas do modelo. Portanto, para o caso que considera apenas as componentes ímpares não múltiplas de três a quantidade de medidas M que deve ser coletada é descrita por $M > M_{pos}$, com M_{pos} definido pela Equação 29. As Equações 28 e 29 foram obtidas considerando que as sequências de ordens harmônicas exemplificadas podem ser descritas por progressões aritméticas.

$$M_{odd} = \frac{N+1}{2} \tag{28}$$

$$M_{pos} = \frac{2N+3-(-1)^N}{6} \tag{29}$$

onde N é a maior ordem harmônica considerada no modelo em que M deve ser inteiro sempre superior a 3, sendo que os valores de M_{odd} e M_{pos} nem sempre serão inteiros.

Por exemplo, para a representação da carga até a 10ª ordem harmônica ($N = 10$), considerando apenas as componentes de ordem ímpar, a quantidade mínima de amostras necessárias é dada por $M > M_{odd}$. Assim, da Equação 28 obtém-se $M_{odd} = 5{,}5$, de modo que $M > 5{,}5$, ou seja, a quantidade de amostras necessárias ao processo de estimação deve ser um valor inteiro maior ou igual a 6.

Tipicamente, a representação da carga é melhorada com a elevação da quantidade de harmônicas consideradas no modelo, porém isto implica no aumento da quantidade de medidas necessárias ao processo de identificação dos parâmetros. Adicionalmente, uma quantidade elevada de medidas auxilia no aumento da imunidade do processo de identificação dos parâmetros do modelo na presença de ruídos de medição. Por outro lado, se a quantidade de medidas for limitada, a Equação 28 ou a Equação 29 pode ajudar a determinar qual será a maior ordem harmônica considerada no modelo da carga. Cabe ressaltar que, para o processo de validação do modelo e de seus parâmetros são necessárias outras medidas, além daquelas já utilizadas no processo de identificação.

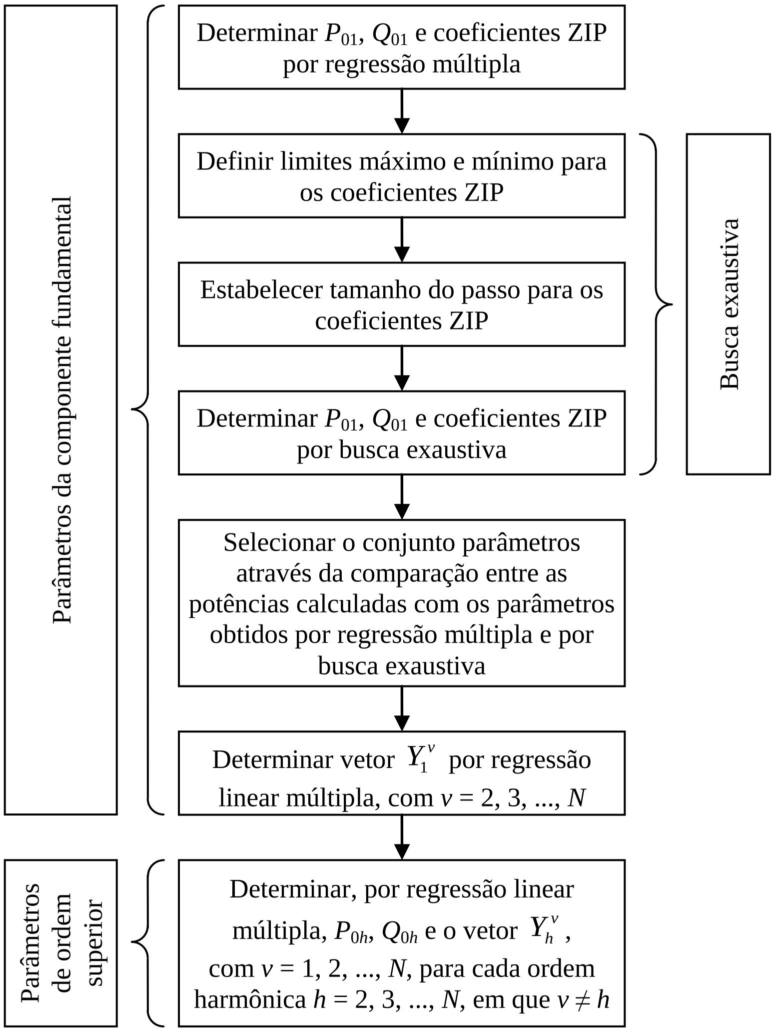
O processo de identificação dos parâmetros foi dividido em duas etapas, conforme descrito nas Seções 3.2.1 e 3.2.2. Na primeira etapa os parâmetros do modelo para a componente fundamental são estimados, inclusive os coeficientes do modelo ZIP. Portanto, nesta etapa os seguintes parâmetros são determinados: P_{01}, p_Z, p_I, p_P, Q_{01}, q_Z, q_I, q_P e $Y_1^2, Y_1^3, \cdots, Y_1^N$, sendo N a maior ordem harmônica considerada no modelo. Assim, a interação das diversas componentes harmônicas da tensão, na componente fundamental, é proporcionada pelas admitâncias Y_1^v, com v assumindo valores inteiros de 2 até N. Na segunda etapa os parâmetros do modelo para as componentes de ordem superior à fundamental são estimados considerando os coeficientes ZIP determinados na primeira etapa. São obtidos, nesta etapa, os seguintes parâmetros para cada ordem harmônica h com valores inteiros de 2 até N: P_{0h}, Q_{0h} e $Y_h^1, \cdots, Y_h^v, \cdots, Y_h^N$, onde v é diferente de h. Estas etapas são detalhadas a seguir e a Figura 4 mostra a sequência resumida para obtenção dos parâmetros, destacando as etapas para determinar os parâmetros da componente fundamental e das demais componentes harmônicas. Na Figura 4 é possível observar que a seleção dos coeficientes ZIP e das potências iniciais P_{01} e Q_{01} é realizada mediante a comparação entre os valores obtidos para as potências ativa e reativa da carga, utilizando o conjunto dos parâmetros determinados por regressão múltipla e por busca exaustiva.

A quantidade de parâmetros do modelo de Norton harmonicamente acoplado é igual ao número de termos do vetor de correntes de Norton mais a quantidade de termos da matriz de admitâncias. Considerando todas as ordens harmônicas até N, a quantidade de parâmetros deste modelo é igual a $N + N^2$. Cada parâmetro é composto por um número complexo, assim a quantidade de termos reais ou imaginários também é igual ao número de parâmetros. No caso do modelo proposto, a quantidade de parâmetros reais ou imaginários é igual a $3 + N^2$. Consequentemente, para casos em que se utiliza mais de 3 ordens harmônicas, a quantidade de parâmetros do modelo proposto é menor que a do modelo de Norton harmonicamente acoplado.

3.2.1 Determinação de Parâmetros da Componente Fundamental

A obtenção dos parâmetros da componente fundamental da potência aparente da carga foi dividida em duas partes. Na primeira parte são obtidos os parâmetros do termo S_h e na

Figura 4 – Sequência resumida para determinação dos parâmetros.



Fonte: Elaborada pelo autor.

segunda parte os parâmetros de ΔS_h, ambos da Equação 19, com h igual a 1. Para que a parcela S_h, na Equação 19, seja preponderante no modelo proposto, e seus coeficientes ZIP representem a proporção de cada componente de carga como impedância, corrente e potência constante, o termo ΔS_h será inicialmente representado como um erro que engloba os ruídos das medições e o erro de modelagem. Assim, a partir das Equações 19, 20 e 21 e das relações descritas pelas Equações 23, 24 e 25, a medida m da parte real e imaginária da potência aparente da carga S_{L1}^m pode ser determinada. Considerando que $S_{L1}^m = V_1^m \cdot I_1^{m^*}$, a partir da Equação 27, suas potências ativa e reativa são descritas pelas Equações 30 e 31, respectivamente. Portanto, inicialmente os parâmetros do termo S_h, com h igual a 1, são determinados, sendo P_{01}, p_Z, p_I e p_P os parâmetros da potência ativa e Q_{01}, q_Z, q_I e q_P os parâmetros da potência reativa.

$$P_{L1}^{m} = P_{01}\left[p_Z\left(\overline{V}_1^{m^2} - 1 \right) + p_I\left(\overline{V}_1^{m} - 1 \right) + 1 \right] + e_{P1}^{m} \tag{30}$$

$$Q_{L1}^{m} = Q_{01}\left[q_Z\left(\overline{V}_1^{m^2} - 1 \right) + q_I\left(\overline{V}_1^{m} - 1 \right) + 1 \right] + e_{Q1}^{m} \tag{31}$$

onde $\overline{V}_1^m = \left|V_1^m\right| / \left|V_{01}\right|$ a partir da Equação 23; e e_{P1}^m e e_{Q1}^m são os erros para a *m*-ésima medida.

Considerando que os coeficientes ZIP indicam a proporção da carga com impedância, corrente e potência constante, é esperado que seus valores sejam limitados entre 0 e 1. Segundo Marti, Ahmadi e Bashualdo (2013), coeficientes ZIP negativos podem proporcionar uma solução matemática válida, mas comprometem o significado físico. Apesar disso, este limite não é considerado em Kim e Kim (2012); Marti, Ahmadi e Bashualdo (2013); e Mota e Mota (2004), onde os coeficientes ZIP chegam a assumir valores negativos e, em alguns casos, valores maiores que 1. Isto também pode ser observado nos valores dos coeficientes ZIP descritos em Bokhari e outros (2014) e Manbachi e outros (2015). Tal comportamento pode estar relacionado à característica não linear de algumas cargas, onde a função entre a potência e a tensão assume uma ordem superior à quadrática (MAITRA et al., 2006).

Com a regressão linear múltipla é possível determinar os coeficientes ZIP, bem como as potências iniciais, obtendo-se um conjunto de valores que minimize a soma quadrática dos erros e_{P1}^m e e_{Q1}^m das Equações 30 e 31, respectivamente. Entretanto, tal método não permite a restrição dos valores dos parâmetros na faixa esperada. Portanto, o uso de um método que determine os parâmetros do modelo proposto, em uma faixa restrita de valores, é vantajoso no sentido de agregar informações físicas sobre o comportamento da carga, mas pode elevar o erro quadrático em relação aos valores encontrados na regressão linear múltipla. Para determinadas cargas, existe uma curva quadrática da potência em função da tensão, com coeficientes limitados, que é aproximadamente igual à curva da potência obtida diretamente pelo processo de regressão múltipla. Entretanto, é suficiente que esta proximidade de curvas ocorra apenas no intervalo limitado entre o valor mínimo e máximo da tensão sobre a carga modelada.

Neste contexto, a busca exaustiva pode ser utilizada para encontrar os valores dos coeficientes ZIP limitados à faixa definida previamente. Tal faixa pode ser definida entre 0 e 1, fornecendo alguma informação física sobre a carga, a partir da proporção de impedância constante, corrente constante e potência constante estabelecida pelos coeficientes ZIP. Como a determinação dos parâmetros do modelo não é realizada em tempo real em que as medidas são realizadas, o uso de um método mais lento não compromete o resultado. A busca exaustiva implementada é capaz de encontrar a melhor solução existente no espaço de busca. Neste processo, a localização da solução é restrita à faixa desejada para os valores dos coeficientes ZIP, porém considerando o passo de incremento especificado. Apesar de lento, este método não contém o caráter probabilístico presente em algumas técnicas de busca, que podem convergir para soluções locais.

Para evitar situações em que a faixa limitada de valores dos coeficientes ZIP é inadequada, devido à característica da carga, optou-se por fazer uma comparação entre os valores dos erros encontrados por ambos os métodos e assim selecionar o conjunto de parâmetros mais apropriado para a carga modelada. Caso o erro encontrado seja superior ao erro máximo admissível, o conjunto de parâmetros oriundos da regressão linear múltipla é adotado, o que pode levar a perda da informação física sobre a carga.

A metodologia para determinar os parâmetros da componente fundamental está descrita a seguir.

3.2.1.1 Parâmetros por regressão múltipla

A partir das Equações 30 e 31 a *m*-ésima medida das potências ativa e reativa da carga, para a componente fundamental, são descritas pelas Equações 32 e 33, respectivamente. O símbolo ^ indica que a variável é uma estimativa.

$$P_{L1}^{m} = \varphi_{1}^{m} \cdot \hat{\boldsymbol{\theta}}_{P1} + e_{P1}^{m} \tag{32}$$

$$Q_{L1}^{m} = \varphi_{1}^{m} \cdot \hat{\boldsymbol{\theta}}_{Q1} + e_{Q1}^{m} \tag{33}$$

onde φ_1^m é o vetor de medidas mostrado na Equação 34; $\hat{\boldsymbol{\theta}}_{P1}$ e $\hat{\boldsymbol{\theta}}_{Q1}$ são os vetores de parâmetros das potências ativa e reativa apresentados nas Equações 35 e 36, respectivamente; e e_{P1}^m e e_{Q1}^m representam os erros de modelagem, de medição ou ruído na saída.

$$\varphi_1^m = \left[\overline{V}_1^{m^2} - 1 \quad \overline{V}_1^m - 1 \quad 1 \right] \tag{34}$$

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_{P1} = \left[p_Z P_{01} \quad p_I P_{01} \quad P_{01} \right]^T \tag{35}$$

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_{Q1} = \left[q_Z Q_{01} \quad q_I Q_{01} \quad Q_{01} \right]^T \tag{36}$$

Uma vez definido o vetor de medidas, para a componente fundamental, é possível escrever a matriz de observação $\boldsymbol{\varphi}_1$. Para M medidas, a partir das Equações 32 e 33, é possível escrever o sistema sobredeterminado de acordo com as Equações 37 e 38.

$$\begin{bmatrix} P_{L1}^1 \\ P_{L1}^2 \\ \vdots \\ P_{L1}^M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_1^1 \\ \varphi_1^2 \\ \vdots \\ \varphi_1^M \end{bmatrix} \cdot \hat{\boldsymbol{\theta}}_{P1} + \begin{bmatrix} e_{P1}^1 \\ e_{P1}^2 \\ \vdots \\ e_{P1}^M \end{bmatrix} \tag{37}$$

$$\begin{bmatrix} Q_{L1}^1 \\ Q_{L1}^2 \\ \vdots \\ Q_{L1}^M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_1^1 \\ \varphi_1^2 \\ \vdots \\ \varphi_1^M \end{bmatrix} \cdot \hat{\boldsymbol{\theta}}_{Q1} + \begin{bmatrix} e_{Q1}^1 \\ e_{Q1}^2 \\ \vdots \\ e_{Q1}^M \end{bmatrix} \tag{38}$$

As representações matriciais das Equações 37 e 38 são descritas pelas Equações 39 e 40.

$$\mathbf{P}_{L1} = \boldsymbol{\varphi}_1 \cdot \hat{\boldsymbol{\theta}}_{P1} + \mathbf{E}_{P1} \tag{39}$$

$$\mathbf{Q}_{L1} = \boldsymbol{\varphi}_1 \cdot \hat{\boldsymbol{\theta}}_{Q1} + \mathbf{E}_{Q1} \tag{40}$$

As estimativas dos vetores de parâmetros $\hat{\boldsymbol{\theta}}_{P1}$ e $\hat{\boldsymbol{\theta}}_{Q1}$ podem ser obtidas pelo método dos mínimos quadrados como descrito pelas Equações 41 e 42 (REY; MUNETA, 2011). Desta forma, são determinados os coeficientes ZIP e as potências iniciais, ativa e reativa do modelo, para a componente fundamental. Posteriormente, este conjunto de parâmetros é utilizado no processo de comparação com os parâmetros obtidos no processo de busca exaustiva.

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_{P1} = \left[\boldsymbol{\varphi}_1^T \cdot \boldsymbol{\varphi}_1\right]^{-1} \cdot \boldsymbol{\varphi}_1^T \cdot \mathbf{P}_{L1} \tag{41}$$

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_{Q1} = \left[\boldsymbol{\varphi}_1^T \cdot \boldsymbol{\varphi}_1\right]^{-1} \cdot \boldsymbol{\varphi}_1^T \cdot \mathbf{Q}_{L1} \tag{42}$$

3.2.1.2 Parâmetros por busca exaustiva

Assim como ocorreu no item 3.2.1.1 desta seção, os parâmetros P_{01}, p_Z e p_I da Equação 30 e os parâmetros Q_{01}, q_Z e q_I da Equação 31 devem ser determinados por busca exaustiva, com o objetivo de minimizar a soma de erros quadráticos entre os valores medidos e estimados das potências ativa e reativa da carga. Porém, aqui os coeficientes ZIP são limitados numa faixa que permita a interpretação física do comportamento da carga modelada.

Para simplificar o processo de busca os mesmos limites são adotados para os coeficientes ZIP das potências ativa e reativa. Já as potências iniciais P_{01} e Q_{01} não requerem restrição de valores, permitindo seu cálculo para cada conjunto de coeficientes ZIP testado durante o processo de busca. Além dos limites estabelecidos para os parâmetros ZIP, o algoritmo de busca exaustiva requer que um passo seja utilizado para incrementar estes parâmetros em cada iteração. Para evitar que o tempo de busca seja muito longo, o tamanho do passo deve ser o maior possível, mantendo a exatidão requerida aos coeficientes ZIP.

Para reduzir o tempo do processo de busca, os limites dos coeficientes ZIP são redefinidos a cada iteração. Assim, na *i*-ésima iteração os coeficientes p_Z e q_Z são iguais a k_Z^i e os coeficientes p_I e q_I são iguais a k_I^i, cujos limites são definidos da seguinte forma: $c_{min} \le k_Z^i \le c_{max}$; $c_{min} \le k_I^i \le (1 - k_Z^i)$, onde c_{min} é o limite inferior e c_{max} é o limite superior dos coeficientes ZIP. O limite máximo de p_I considera o fato de que $p_Z + p_I \le 1$ já que a relação descrita pela Equação 24 deve ser obedecida. O mesmo ocorre para q_I para a relação descrita pela Equação 25. Se na *i*-ésima iteração os coeficientes p_P e q_P, que são iguais a k_P^i, estiverem fora do intervalo definido por c_{min} e c_{max} o conjunto de coeficientes k_Z^i, k_I^i e k_P^i é descartado.

Para o conjunto de coeficientes da iteração em andamento são calculados os valores das potências iniciais P_{01} e Q_{01} por regressão linear. Desta forma, para a *i*-ésima iteração, a partir das Equações 30 e 31, a medida *m* da potência aparente da carga é descrita pela Equação 43.

$$S_{L1}^{m} = \left[k_Z^i \left(\overline{V}_1^{m^2} - 1 \right) + k_I^i \left(\overline{V}_1^{m} - 1 \right) + 1 \right] \cdot \left(P_{01}^i + jQ_{01}^i \right) + e_{S1}^{m,i} \tag{43}$$

onde a parte real e a parte imaginária de $e_{S1}^{m,i}$ são iguais a $e_{P1}^{m,i}$ e $e_{Q1}^{m,i}$, respectivamente, que são os erros entre as potências medidas e estimadas na iteração i.

Para um conjunto de M medidas a Equação 43 pode ser escrita conforme a Equação 44.

$$\begin{bmatrix} S_{L1}^1 \\ S_{L1}^2 \\ \vdots \\ S_{L1}^M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_1^{1,i} \\ \beta_1^{2,i} \\ \vdots \\ \beta_1^{M,i} \end{bmatrix} \cdot S_{01}^i + \begin{bmatrix} e_{S1}^{1,i} \\ e_{S1}^{2,i} \\ \vdots \\ e_{S1}^{M,i} \end{bmatrix} \tag{44}$$

onde

$$\beta_1^{m,i} = k_Z^i \left(\overline{V}_1^{m^2} - 1 \right) + k_I^i \left(\overline{V}_1^{m} - 1 \right) + 1 \tag{45}$$

Matricialmente a Equação 44 pode ser escrita pela Equação 46.

$$\mathbf{S}_{L1} = \boldsymbol{\beta}_1^i \cdot S_{01}^i + \mathbf{E}_{S1}^i \tag{46}$$

A estimativa do valor inicial da potência aparente para a i-ésima iteração é definida pela Equação 47.

$$S_{01}^i = \left[\boldsymbol{\beta}_1^{i^T} \cdot \boldsymbol{\beta}_1^i \right]^{-1} \cdot \boldsymbol{\beta}_1^{i^T} \cdot \mathbf{S}_{L1} \tag{47}$$

Em cada iteração as somas dos erros quadráticos das potências ativa e reativa da carga são calculadas e o conjunto de parâmetros que fornece o menor erro é armazenado. Ao final do processo de busca obtém-se o conjunto de parâmetros com o menor erro quadrático.

3.2.1.3 Seleção do conjunto de parâmetros

A partir das Equações 24, 25 e dos parâmetros já encontrados, os coeficientes p_P e q_P são dados pelas Equações 48 e 49, respectivamente.

$$p_P = 1 - p_Z - p_I \tag{48}$$

$$q_P = 1 - q_Z - q_I \tag{49}$$

Então, as estimativas das potências ativa e reativa do termo S_h, para um dado valor de tensão fundamental, são descritas pelas Equações 50 e 51, respectivamente.

$$\hat{P}_1^m = P_{01}\left[p_Z \overline{V}_1^{m^2} + p_I \overline{V}_1^m + p_P \right] \tag{50}$$

$$\hat{Q}_1^m = Q_{01}\left[q_Z \overline{V}_1^{m^2} + q_I \overline{V}_1^m + q_P \right] \tag{51}$$

onde a estimativa da potência aparente é descrita pela Equação 52.

$$\hat{S}_1^m = \hat{P}_1^m + j\hat{Q}_1^m \tag{52}$$

Considerando as Equações 50 e 51, as estimativas das potências ativa e reativa, utilizando o conjunto de parâmetros obtido pelo método da regressão múltipla, são denominadas $\hat{P}_1^{fit}$ e $\hat{Q}_1^{fit}$, respectivamente. Já as estimativas das potências ativa e reativa, utilizando o conjunto de parâmetros obtido pelo método da busca exaustiva, são denominadas $\hat{P}_1^{exa}$ e $\hat{Q}_1^{exa}$, respectivamente.

Com os conjuntos de parâmetros obtidos pela regressão múltipla e pela busca exaustiva é possível realizar a comparação entre as potências obtidas pelos dois métodos, visando identificar se o erro encontrado com a limitação dos coeficientes ZIP é superior ao erro máximo admissível e_{max}. O erro máximo entre as estimativas das potências ativa e reativa estão descritos nas Equações 53 e 54, respectivamente, restritos apenas à faixa de valores de $\overline{V}_1$ aplicados sobre a carga.

$$e_{P1}^{max} = \max\left(\left| \hat{P}_1^{fit} - \hat{P}_1^{exa} \right| \right) \tag{53}$$

$$e_{Q1}^{max} = \max\left(\left| \hat{Q}_1^{fit} - \hat{Q}_1^{exa} \right| \right) \tag{54}$$

Estes erros podem ser calculados em relação à magnitude da potência aparente inicial obtida pelo método da regressão múltipla $\left| S_{01}^{fit} \right|$, onde $S_{01}^{fit} = P_{01}^{fit} + jQ_{01}^{fit}$. Assim, o conjunto de parâmetros obtidos para a potência ativa pelo método da busca exaustiva é considerado apenas se a relação $e_{P1}^{max} \Big/ \left|S_{01}^{fit}\right| \leq e_{max}$ for satisfeita. Caso esta relação não seja satisfeita o conjunto de parâmetros obtidos na regressão múltipla é adotado. O mesmo procedimento é utilizado para a potência reativa, considerando a relação $e_{Q1}^{max} \Big/ \left|S_{01}^{fit}\right| \leq e_{max}$.

3.2.1.4 Estimação da matriz de admitância

Agora que os coeficientes ZIP e as potências iniciais foram determinados é possível obter os valores dos demais parâmetros da componente fundamental do modelo. Portanto, os parâmetros de ΔS_h da Equação 19 são obtidos considerando as estimativas da potência aparente $\hat{S}_h^m$ com h igual a 1. Assim, a partir das Equações 19 e 52, a medida m do termo ΔS_h para a componente fundamental pode ser escrita pela Equação 55.

$$\Delta S_1^m = \phi_1^m \cdot \hat{\boldsymbol{\theta}}_1 + \varepsilon_1^m \tag{55}$$

onde $\Delta S_1^m = S_{L1}^m - \hat{S}_1^m$; ϕ_1^m é o vetor de medidas descrito pela Equação 56; $\hat{\boldsymbol{\theta}}_1$ é o vetor de parâmetros estimados da potências aparente descrito pela Equação 57; e ε_1^m representa o erro de modelagem e os ruídos de medição.

$$\phi_1^m = \left[\left|V_2^m\right|^2 \quad \left|V_3^m\right|^2 \quad \cdots \quad \left|V_N^m\right|^2 \right] \tag{56}$$

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_1 = \left[Y_1^2 \quad Y_1^3 \quad \cdots \quad Y_1^N \right]^T \tag{57}$$

Uma vez definido o vetor de medidas, para a componente fundamental, é possível escrever a matriz de observação $\boldsymbol{\Phi}_1$. Para M medidas, a partir da Equação 55, é possível descrever o sistema sobredeterminado de acordo com a Equação 58.

$$\begin{bmatrix} \Delta S_1^1 \\ \Delta S_1^2 \\ \vdots \\ \Delta S_1^M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_1^1 \\ \phi_1^2 \\ \vdots \\ \phi_1^M \end{bmatrix} \cdot \hat{\boldsymbol{\theta}}_1 + \begin{bmatrix} \varepsilon_1^1 \\ \varepsilon_1^2 \\ \vdots \\ \varepsilon_1^M \end{bmatrix} \tag{58}$$

A representação matricial da Equação 58 está escrita na Equação 59.

$$\mathbf{\Delta S}_1 = \mathbf{\Phi}_1 \cdot \hat{\boldsymbol{\theta}}_1 + \boldsymbol{\varepsilon}_1 \tag{59}$$

O vetor com os parâmetros estimados $\hat{\boldsymbol{\theta}}_1$ pode ser obtido pelo método de regressão linear múltipla como descrito pela Equação 60. Desta forma todos os parâmetros do modelo, para a componente fundamental, podem ser estimados.

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_1 = \left[\mathbf{\Phi}_1{}^T \cdot \mathbf{\Phi}_1\right]^{-1} \cdot \mathbf{\Phi}_1{}^T \cdot \mathbf{\Delta S}_1 \tag{60}$$

3.2.2 Determinação de Parâmetros das Componentes Harmônicas de Ordem Superior à Fundamental

De posse dos parâmetros da componente fundamental é possível determinar os parâmetros das demais ordens harmônicas. A partir da Equação 19, a *m*-ésima medida da potência ativa e da potência reativa da carga, para a componente harmônica de ordem *h*, superior à fundamental, é descrita pelas Equações 61 e 62, respectivamente.

$$P_{Lh}^m = \varphi_{Ph}^m \cdot \hat{\boldsymbol{\theta}}_{Ph} + \varepsilon_{Ph}^m \tag{61}$$

$$Q_{Lh}^m = \varphi_{Qh}^m \cdot \hat{\boldsymbol{\theta}}_{Qh} + \varepsilon_{Qh}^m \tag{62}$$

onde os vetores de medidas φ_{Ph}^m e φ_{Qh}^m são descritos pelas Equações 63 e 64, respectivamente, considerando os coeficientes do modelo ZIP já determinados para a componente fundamental; e os vetores de parâmetros do modelo $\hat{\boldsymbol{\theta}}_{Ph}$ e $\hat{\boldsymbol{\theta}}_{Qh}$ são definidos pelas Equações 65 e 66, respectivamente.

$$\varphi_{Ph}^m = \left[p_Z \overline{V}_h^{m\,2} + p_I \overline{V}_h^m + p_P \quad \left|V_1^m\right|^2 \cdots \left|V_v^m\right|^2 \cdots \left|V_N^m\right|^2 \right] \tag{63}$$

$$\varphi_{Qh}^m = \left[q_Z \overline{V}_h^{m\,2} + q_I \overline{V}_h^m + q_P \quad \left|V_1^m\right|^2 \cdots \left|V_v^m\right|^2 \cdots \left|V_N^m\right|^2 \right] \tag{64}$$

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_{Ph} = \left[P_{0h} \quad G_h^1 \quad \cdots \quad G_h^v \quad \cdots \quad G_h^N\right]^T \tag{65}$$

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_{Qh} = \begin{bmatrix} Q_{0h} & B_h^1 & \cdots & B_h^v & \cdots & B_h^N \end{bmatrix}^T \tag{66}$$

onde $v \neq h$ e $1 < h \leq N$.

Uma vez definido o vetor de medidas é possível representar genericamente as matrizes de observação para as potências ativa e reativa da carga. Para M medidas, a partir das Equações 61 e 62, é possível escrever o sistema sobredeterminado de acordo com as Equações 67 e 68.

$$\begin{bmatrix} P_{Lh}^1 \\ P_{Lh}^2 \\ \vdots \\ P_{Lh}^M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_{Ph}^1 \\ \varphi_{Ph}^2 \\ \vdots \\ \varphi_{Ph}^M \end{bmatrix} \cdot \hat{\boldsymbol{\theta}}_{Ph} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{Ph}^1 \\ \varepsilon_{Ph}^2 \\ \vdots \\ \varepsilon_{Ph}^M \end{bmatrix} \tag{67}$$

$$\begin{bmatrix} Q_{Lh}^1 \\ Q_{Lh}^2 \\ \vdots \\ Q_{Lh}^M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_{Qh}^1 \\ \varphi_{Qh}^2 \\ \vdots \\ \varphi_{Qh}^M \end{bmatrix} \cdot \hat{\boldsymbol{\theta}}_{Qh} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{Qh}^1 \\ \varepsilon_{Qh}^2 \\ \vdots \\ \varepsilon_{Qh}^M \end{bmatrix} \tag{68}$$

As representações matriciais das Equações 67 e 68 são caracterizadas pelas Equações 69 e 70.

$$\mathbf{P}_{Lh} = \boldsymbol{\varphi}_{Ph} \cdot \hat{\boldsymbol{\theta}}_{Ph} + \boldsymbol{\varepsilon}_{Ph} \tag{69}$$

$$\mathbf{Q}_{Lh} = \boldsymbol{\varphi}_{Qh} \cdot \hat{\boldsymbol{\theta}}_{Qh} + \boldsymbol{\varepsilon}_{Qh} \tag{70}$$

As estimativas dos vetores de parâmetros podem ser obtidas pelo método da regressão linear múltipla como descrito pelas Equações 71 e 72. Desta forma, todos os parâmetros do modelo, para a componente de ordem superior à fundamental, podem ser determinados. Entretanto, as matrizes de observação podem conter colunas com valores bem distintos. Por exemplo, uma coluna com os valores das magnitudes da tensão fundamental ao quadrado e outra coluna com os valores quadráticos das magnitudes de tensão de ordem 11. Para evitar problemas de mal condicionamento dos regressores, durante o processo de inversão matricial, utilizou-se uma transformação de dados, conforme descrito no APÊNDICE B. Neste caso, foi utilizada a metodologia para sistemas sem termo independente.

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_{Ph} = \left[\boldsymbol{\varphi}_{Ph}^T \cdot \boldsymbol{\varphi}_{Ph}\right]^{-1} \cdot \boldsymbol{\varphi}_{Ph}^T \cdot \mathbf{P}_{Lh} \tag{71}$$

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_{Qh} = \left[\boldsymbol{\varphi}_{Qh}^{T} \cdot \boldsymbol{\varphi}_{Qh}\right]^{-1} \cdot \boldsymbol{\varphi}_{Qh}^{T} \cdot \mathbf{Q}_{Lh} \qquad (72)$$

3.2.3 Seleção de dados

A escolha dos dados utilizados no processo de estimação dos parâmetros do modelo deve considerar diversos aspectos para evitar que o problema numérico de inversão matricial seja mal condicionado. Consequentemente, durante a seleção dos dados para o processo de estimação deve-se:

- Eliminar componentes harmônicas de tensão cujas magnitudes são próximas de zero. No entanto, a eliminação de uma ordem harmônica não deve provocar redução significativa na *DTT*%, indicando que não houve degradação significativa da informação. Assim, foi adotado que uma ordem harmônica poderá ser eliminada caso a *DTT*% média, sem esta harmônica, não apresente redução superior a 0,5% da *DTT*% média, considerando todas as ordens harmônicas até *N*, que é a maior ordem harmônica considerada no modelo;

- Verificar se a tensão inicial V_{0h} escolhida é diferente de zero para cada ordem harmônica considerada no modelo. Caso contrário, é necessário adotar outra amostra como tensão inicial;

- Determinar a quantidade de amostras para que o sistema seja sobredeterminado. Desta forma, a quantidade de amostras *M* deve ser superior ao número de harmônicas consideradas no modelo. Para o caso em que as harmônicas de ordem par são eliminadas é necessário que $M > M_{odd}$, onde M_{odd} é descrito pela Equação 28. Para o caso em que somente as ordens harmônicas ímpares não múltiplas de 3 são consideradas é necessário que $M > M_{pos}$, onde M_{pos} é descrito pela Equação 29. Quanto mais ruidoso for o conjunto de dados maior deve ser a quantidade de amostras;

- Examinar se os dados de estimação representam diferentes condições de operação do sistema. A concentração de dados de estimação, em determinados pontos de sua faixa de variação pretendida, pode indicar pouca diversidade de condições de operação. Isto pode acarretar na obtenção de parâmetros que satisfazem apenas uma região da faixa de operação pretendida. Para evitar este fato, a faixa de variação da tensão fundamental sobre a carga a ser modelada foi dividida em uma quantidade de partes igual ao número de componentes harmônicas consideradas no modelo, onde cada parte deverá conter pelo menos uma amostra. Para situações em que os dados são ruidosos deve-se considerar a necessidade de mais amostras em cada faixa de variação da tensão;

- Avaliar se as matrizes de observação têm posto pleno de colunas. Neste caso, o posto da matriz deve ser igual à quantidade de parâmetros a serem estimados. Desta forma, é possível garantir que as colunas da matriz de observação são linearmente independentes;

- Verificar se a *DTT*% da tensão sobre a carga não é superior a 10%, conforme sugerido por Ndiay e outros (2007) e estabelecido como limite máximo por ANEEL (2017)[7]. Assim, pretende-se evitar problemas de não linearidades devido a valores de tensão com distorções harmônicas muito elevadas.

3.3 Estudos de Caso e Resultados

Diferentes tipos de cargas foram modeladas, visando aplicar o modelo proposto, validar a metodologia para identificar seus parâmetros e mostrar sua flexibilidade na representação de cargas com características distintas.

A fim de obter os dados necessários ao processo de estimação e validação dos parâmetros destas cargas, estudos foram realizados utilizando simulador e circuito experimental. As cargas avaliadas foram do tipo linear e cargas eletrônicas, bem como combinações destas cargas. Em todos estes casos a rede em que a carga está conectada é representada por um circuito equivalente de Thévenin, composto por uma fonte de tensão V_S, com diversas componentes harmônicas, e uma impedância equivalente do sistema Z_S (ALMEIDA; KAGAN, 2013; JAVADI et al., 2016; LAMICH et al., 2017; SENRA; BOAVENTURA; MENDES, 2017). Elementos como transformadores e cargas não lineares conectados ao sistema distorcem a tensão aplicada sobre a carga a ser modelada. Tal influência é representada através da fonte V_S no circuito equivalente de Thévenin da rede. Além disso, a

[7] Os limites da *DTT*% são estabelecidos para diferentes faixas de tensão nominal, porém foi adotado o maior valor admissível.

impedância equivalente Z_S considera a queda de tensão harmônica na rede provocada pela corrente harmônica da carga. Devido à presença de cargas não lineares no sistema, a tensão V_S contém diversas componentes harmônicas. Nos estudos de caso deste capítulo, a modelagem foi delimitada numa faixa de variação aproximadamente igual a $\pm$ 3% da tensão fundamental sobre as cargas.

3.3.1 Cargas Modeladas

A seguir estão listadas as cargas empregadas nos estudos de caso de acordo com a sua implementação:

- *Software* de Simulação
  - Carga I: carga linear de impedância constante;
  - Carga II: retificador trifásico a diodo com carga de impedância constante;
  - Carga III: retificador trifásico a diodo com carga de corrente constante;
  - Carga IV: retificador trifásico a diodo com carga de potência constante;
  - Carga V: combinação em paralelo de três retificadores trifásicos a diodo com carga de impedância constante, corrente constante e potência constante.
- Experimental
  - Carga VI: retificador trifásico a diodo com carga de impedância constante.

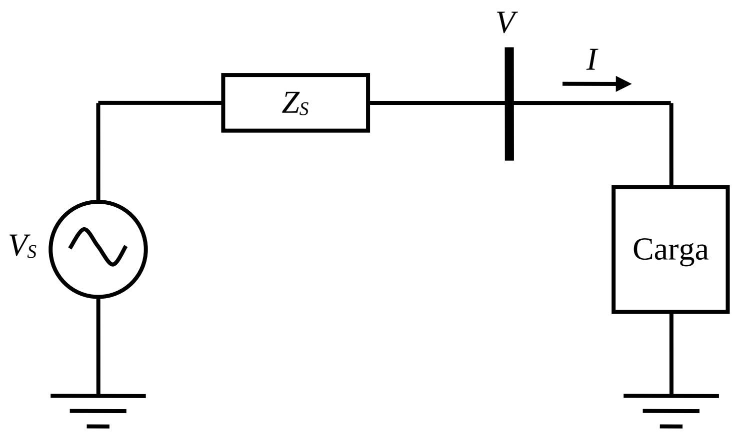
As Cargas de I a V foram implementadas no *software* de simulação de transitórios eletromagnéticos PSCAD[8]. Já a Carga VI foi construída e testada em laboratório. Os diagramas e os dados de todas as cargas avaliadas estão descritos no APÊNDICE C.

[8] *Power Systems Computer Aided Design* é um software com interface gráfica para simulação de respostas transitórias de sistemas elétricos de potência.

3.3.2 Equivalente de Rede

Como citado anteriormente o circuito equivalente de Thévenin da rede é composto por uma fonte de tensão V_S, com diversas componentes harmônicas, e uma impedância equivalente do sistema Z_S. Este circuito equivalente e a carga estão mostrados na Figura 5, onde V e I são a tensão e a corrente na carga. Os dados do circuito equivalente estão descritos no APÊNDICE C.

Figura 5 – Sistema para estudo de caso.



Fonte: Elaborada pelo autor.

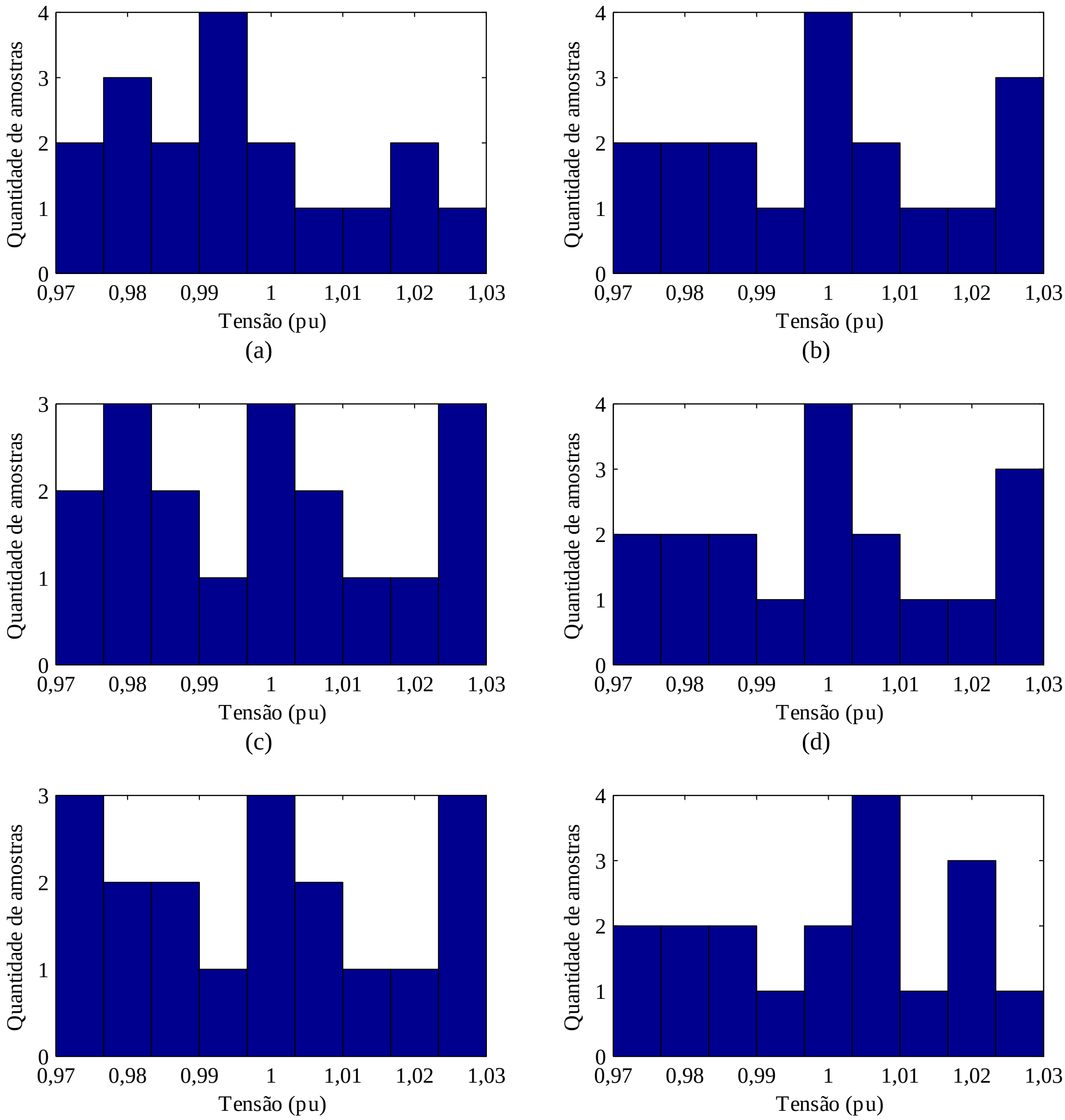
A fonte de tensão trifásica V_S do circuito equivalente da rede contém diversas componentes harmônicas. Os distúrbios necessários à identificação dos parâmetros do modelo da carga foram obtidos por variações aleatórias de amplitude da tensão da fonte V_S. Tais variações da tensão da fonte ocorrem tanto na componente fundamental quanto nas componentes harmônicas de ordem 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23 e 25. Cada variação de tensão ocorreu dentro de uma faixa que assume valores percentuais distintos para cada ordem harmônica. As variações da componente fundamental de tensão foram de aproximadamente 3%. Estes distúrbios visam o funcionamento do circuito em diferentes pontos com independência linear entres as amostras coletadas e suas componentes harmônicas, possibilitando a identificação dos parâmetros do modelo. Desta forma, a tensão sobre a carga é influenciada pela tensão da fonte V_S e pela queda de tensão sobre a impedância Z_S, devido à corrente da carga que contém várias componentes harmônicas.

3.3.3 Quantidade de Amostras e Seleção de Dados

Em todos os estudos de caso deste capítulo, a modelagem para a representação das cargas foi realizada considerando até a 25ª ordem harmônica, ou seja, N igual a 25. Portanto, esta quantidade de ordens harmônicas foi considerada tanto na modelagem quanto nas medições para a coleta de dados. As amostras das tensões e correntes harmônicas nas cargas avaliadas foram coletadas após as variações na tensão da fonte V_S.

Seguindo as recomendações da Seção 3.2.3 para a seleção dos dados de estimação, os valores das magnitudes das tensões harmônicas das cargas avaliadas foram examinados previamente. Assim, detectou-se que as componentes de ordem par e múltiplas de três não são relevantes devido ao seu valor reduzido e, portanto, devem ser excluídas da modelagem. Em todos os casos a DTT_I% na carga, que é calculada somente com as componentes ímpares não múltiplas de 3, não provocou redução superior a 0,5% da DTT%. Consequentemente, é possível utilizar a Equação 29 para determinar a quantidade mínima de amostras necessárias ao processo de estimação dos parâmetros do modelo. Para o valor de N, definido anteriormente igual a 25, têm-se que M_{pos} é igual a 9. Portanto, a quantidade de medidas deve ser um número inteiro maior do que o valor de M_{pos} calculado. Considerando que pode haver a presença de ruídos nas medições, devido ao método de medição empregado no estudo experimental e devido aos métodos de cálculo utilizados pelo simulador, adotou-se a quantidade de medidas M igual a 18 para a construção do sistema sobredeterminado do processo de estimação dos parâmetros do modelo. Nos testes realizados foram coletadas 26 amostras de tensão e corrente da carga. Aproximadamente 70% dos dados coletados, 18 amostras, foram utilizados no processo de estimação dos parâmetros e os demais dados, 8 amostras, foram utilizados no processo de validação do modelo. O valor da primeira amostra foi atribuído à tensão inicial V_0, já que todas as suas componentes harmônicas ímpares não múltiplas de 3 são diferentes de zero. Os histogramas das amostras de tensão, apresentados no Gráfico 1, mostram que os dados proporcionam diferentes condições de operação, já que há pelo menos uma amostra em cada segmento da faixa de variação da tensão fundamental na carga. Nestes histogramas, a tensão base de fase é igual a 100 V. A faixa de variação foi considerada igual a ± 3% em relação à tensão base, que é a faixa de variação de tensão na qual se deseja modelar a carga. Para todas as cargas avaliadas, os postos das matrizes de observação das Equações 59, 69 e 70 são iguais a 8, 9 e 9, respectivamente. Como estes valores correspondem à quantidade de colunas destas matrizes é possível constatar que suas colunas são linearmente independentes. A DTT% para todas as cargas avaliadas foi inferior a 10%.

Gráfico 1 – Histogramas das amostras de tensão fundamental para diferentes cargas:
(a) Carga I; (b) Carga II; (c) Carga III; (d) Carga IV; (e) Carga V; (f) Carga VI.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando as Cargas de I a V, para determinar suas componentes harmônicas de tensão e corrente, no simulador, foi utilizada a Transformada Rápida de Fourier (FFT), já disponível no PSCAD. De acordo com as orientações do *software*, a cada variação de tensão devem ser considerados apenas os dados da FFT fornecidos após um ciclo de captura do sinal de entrada. Visando considerar tal orientação, referente à forma de cálculo usada pelo *software*, e também para evitar que as amostras sejam coletadas durante o transitório da carga, a captura das leituras foram realizadas 3 ciclos da rede após a variação da tensão da fonte.

No caso experimental da Carga VI, o medidor de qualidade de energia Voltech modelo PM3000A foi utilizado para obter os valores de magnitude e ângulo das componentes harmônicas de tensão e corrente, em uma fase de entrada do retificador trifásico. O circuito foi considerado equilibrado e o modelo proposto aplicado em cada uma das fases do sistema. Neste caso, as amostras também foram coletadas após as variações da tensão da fonte. Porém, a captura ocorreu somente após o medidor de qualidade de energia realizar a média de 64 leituras consecutivas.

3.3.4 Estimação dos Parâmetros do Modelo

O processo de identificação dos parâmetros do modelo proposto foi aplicado de acordo com o equacionamento descrito na Seção 3.2. Assim, considerando os dados de estimação, podem ser obtidos os parâmetros p_Z, p_I, p_P, q_Z, q_I, q_P, P_{0h}, Q_{0h} e Y_h^v, para cada h e v assumindo os valores 1, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23 e 25, sendo que para as demais ordens harmônicas os valores de P_{0h}, Q_{0h} e Y_h^v são nulos. Os parâmetros da componente fundamental são determinados como descrito na Seção 3.2.1. Primeiramente, os parâmetros P_{01}, p_Z e p_I são obtidos por regressão múltipla pela Equação 41 e p_P é calculado pela Equação 48. Os parâmetros Q_{01}, q_Z, q_I e q_P são determinados da mesma forma pelas Equações 42 e 49. Os valores obtidos estão descritos na Tabela 1.

Para a busca exaustiva, os limites dos coeficientes ZIP c_{min} e c_{max} foram definidos como 0 e 1, respectivamente, e o passo de iteração foi definido igual a 0,0001. Durante o processo iterativo os valores das potências iniciais P_{01} e Q_{01}, são calculados pela Equação 47. Os valores dos parâmetros encontrados por este método estão descritos na Tabela 1. Os erros percentuais das potências ativa e reativa fornecidos pela busca exaustiva, em relação ao método de regressão, também estão descritos na Tabela 1. Para todas as cargas avaliadas, nenhum destes erros superou o erro máximo admissível e_{max}, cujo valor foi definido igual a 0,5%. Portanto, para as Cargas de I a VI foram adotados os parâmetros encontrados pelo método da busca exaustiva.

Tabela 1 – Parâmetros do modelo ZIP obtidos para diferentes cargas.

Método	Parâmetro	Carga I	Carga II	Carga III	Carga IV	Carga V	Carga VI
Regressão Múltipla	p_Z	1,0002	0,9916	0,0172	0,0374	0,3402	0,9756
	p_I	– 0,0003	0,0127	0,9688	– 0,0810	0,3186	0,0463
	p_P	0,0002	– 0,0043	0,0141	1,0436	0,3413	– 0,0218
	q_Z	0,9999	– 1,2928	– 2,3946	– 2,0860	– 2,3148	11,3691
	q_I	0,0002	4,7239	5,5301	3,4508	5,4222	– 19,9964
	q_P	– 0,0001	– 2,4311	– 2,1355	– 0,3648	– 2,1074	9,6273
	P_{01} (W)	247,643	783,069	774,558	601,905	804,098	412,292
	Q_{01} (VAr)	247,644	77,959	71,747	42,669	73,937	26,476
Busca exaustiva	p_Z	**1,0000**	**0,9960**	0,0171	0,0000	**0,3405**	**0,9988**
	p_I	0,0000	0,0039	**0,9689**	0,0000	**0,3179**	0,0011
	p_P	0,0000	0,0001	0,0140	**1,0000**	**0,3416**	0,0001
	q_Z	1,0000	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000
	q_I	0,0000	0,0000	0,7279	0,0000	0,7845	0,0000
	q_P	0,0000	0,0000	0,2721	1,0000	0,2155	0,0000
	P_{01} (W)	247,643	783,069	774,558	601,904	804,098	412,297
	Q_{01} (VAr)	247,644	77,935	71,696	42,588	73,883	26,216
	$e_{P1}^{max} \big/ \left\|S_{01}^{fit}\right\|$	0,000%	0,000%	0,000%	0,016%	0,000%	0,001%
	$e_{Q1}^{max} \big/ \left\|S_{01}^{fit}\right\|$	0,000%	0,040%	0,008%	0,144%	0,011%	0,063%

O tempo de execução da busca é maior à medida que o passo de interação diminui. A fim de ilustrar tal afirmação, como exemplo, utilizou-se o estudo de caso da Carga V, cujo tempo decorrido da busca foi de, aproximadamente, 25 minutos para um passo de iteração igual a 0,0001. Porém, se o passo for aumentado para 0,001 o tempo de busca reduz significativamente para, aproximadamente, 16 segundos. Este exemplo demonstra a grande influência do tamanho do passo de iteração no tempo de execução do algoritmo de busca. Entretanto, para mostrar que existem métodos alternativos de busca, foi utilizada a ferramenta de modelagem AMPL[9] em conjunto com o pacote de otimização MINOS[10]. Neste caso, a solução foi obtida em, aproximadamente, 4 segundos e os parâmetros estimados foram muito

[9] *A Mathematical Programming Language* (Uma linguagem para programação matemática): é uma linguagem de modelagem algébrica, contendo uma interface para modelar e resolver problemas de otimização, que comporta diversos pacotes de otimização para problemas computacionais de larga escala e alta complexidade.

[10] *Modular In-core Nonlinear Optimization System* (Sistema modular de otimização não linear): é um pacote de otimização para problemas matemáticos lineares e não lineares contendo variáveis contínuas sujeitas a restrições.

próximos dos valores obtidos através da busca exaustiva. Logo, o tempo de execução da busca pode ser modificado em função da exatidão empregada ou mesmo pelo uso de diferentes técnicas para localizar a melhor solução do conjunto de parâmetros do modelo.

A Tabela 2 contém os valores obtidos para os parâmetros deste exemplo para cada método avaliado. Todos estes cálculos foram executados em um computador com processador Intel Core i7-3632QM com 8 GB de memória RAM.

Tabela 2 – Parâmetros do modelo ZIP para a Carga V obtidos por diferentes métodos.

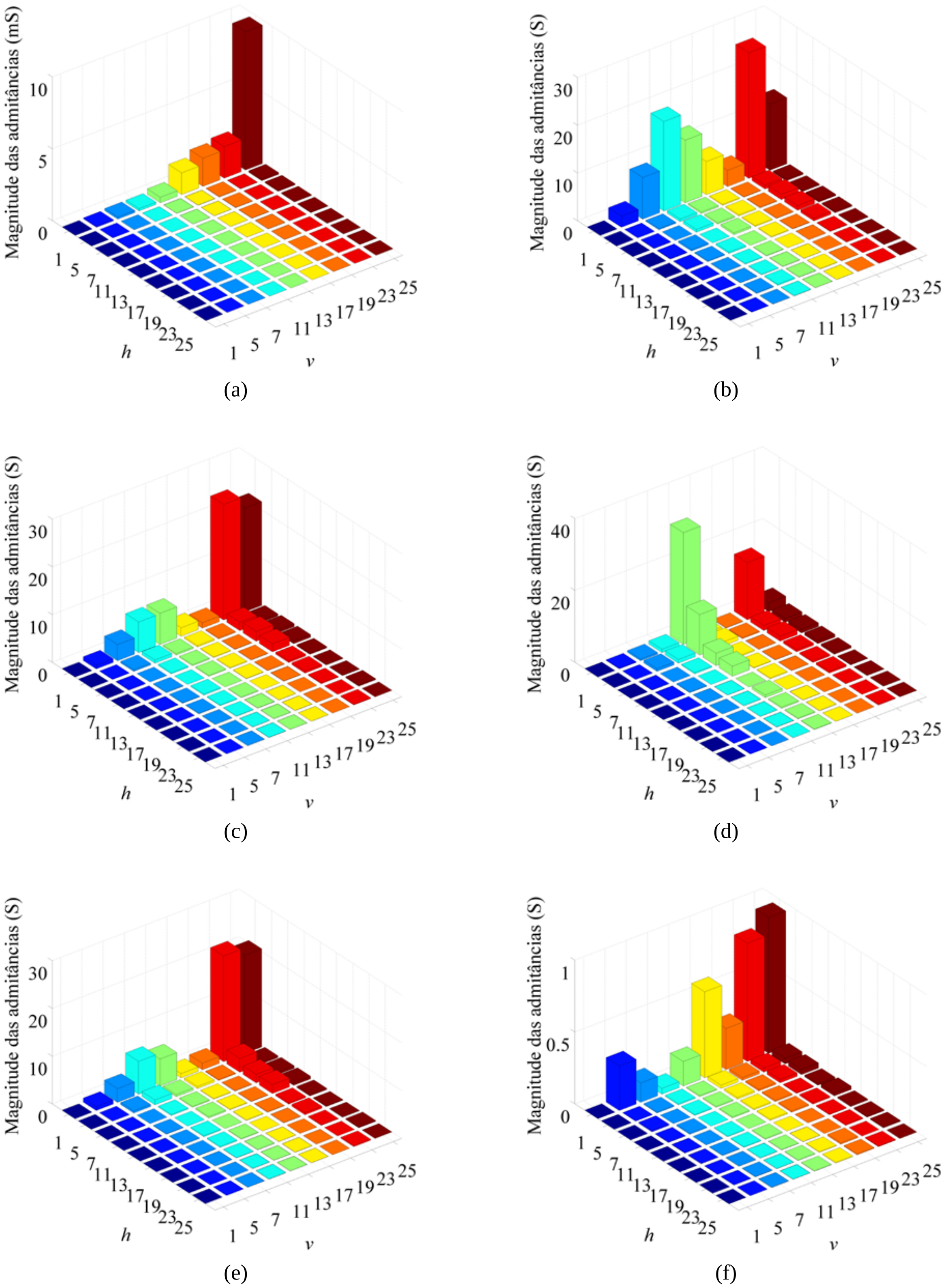
Parâmetro	**Busca exaustiva**		**AMPL/MINOS**
	Passo = 0,0001	**Passo = 0,001**	
p_Z	0,3405	0,339	0,3403
p_I	0,3179	0,321	0,3183
p_P	0,3416	0,340	0,3414
q_Z	0,0000	0,000	0,0000
q_I	0,7845	0,784	0,7845
q_P	0,2155	0,216	0,2155
P_{01} (W)	804,098	804,098	804,098
Q_{01} (VAr)	73,883	73,883	73,883

Uma vez que os coeficientes ZIP e as potências iniciais foram determinados, os quais estão descritos na Tabela 1, os valores das admitâncias Y_1^v, com v assumindo valores inteiros de 2 até N, podem ser calculados pela Equação 60.

A partir dos parâmetros já determinados para a componente fundamental, é possível determinar os parâmetros para as componentes de ordem superior, como descrito na Seção 3.2.2. Os valores das potências iniciais P_{0h} e Q_{0h}, para h maior que 1, bem como as admitâncias Y_h^v, podem ser obtidos pelas Equações 71 e 72. As magnitudes das admitâncias são mostradas no Gráfico 2 e os valores de P_{0h} e Q_{0h} estão descritos na Tabela 3.

O APÊNDICE D contém um exemplo com o passo a passo de utilização da metodologia para a determinação dos parâmetros do modelo proposto neste capítulo.

Gráfico 2 – Magnitudes das admitâncias para diferentes cargas:
(a) Carga I; (b) Carga II; (c) Carga III; (d) Carga IV; (e) Carga V; (f) Carga VI.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 3 – Potências iniciais estimadas para diferentes cargas.

	h	Carga I	Carga II	Carga III	Carga IV	Carga V	Carga VI
P_{0h} (W)	5	0,168	3,684	6,811	3,608	8,906	1,579
	7	0,084	– 0,838	– 1,903	– 0,557	– 1,557	– 0,179
	11	0,042	– 0,726	– 1,025	– 0,432	– 1,033	– 0,204
	13	0,016	– 0,183	– 0,353	0,456	– 0,318	– 0,046
	17	0,004	0,379	0,840	0,458	0,891	– 0,024
	19	0,002	0,059	0,137	0,037	0,132	– 0,008
	23	0,001	– 0,957	– 0,197	– 0,107	– 0,168	0,008
	25	0,000	0,119	0,186	– 0,061	0,197	0,005
Q_{0h} (VAr)	5	0,034	– 0,811	– 2,724	– 5,708	– 3,101	0,273
	7	0,012	1,242	1,328	– 1,241	1,081	– 0,130
	11	0,004	1,209	0,987	– 0,580	0,991	– 0,176
	13	0,001	– 0,291	– 0,827	0,002	– 0,698	– 0,068
	17	0,000	– 0,152	– 0,504	– 0,763	– 0,438	– 0,054
	19	0,000	– 0,169	– 0,536	– 0,374	– 0,451	– 0,029
	23	0,000	0,171	– 0,117	– 0,178	– 0,118	– 0,049
	25	0,000	– 0,080	– 0,211	– 0,007	– 0,195	– 0,025

3.3.5 Resultados

Os estudos de caso das Cargas de I a VI têm como objetivo aplicar o novo modelo proposto neste capítulo, bem como a metodologia para a obtenção dos seus parâmetros, visando as respectivas representações quando submetidas a tensões variáveis. De acordo com a metodologia apresentada anteriormente, para cada carga avaliada foram obtidos os valores dos seguintes parâmetros do modelo: potências iniciais (P_{0h} e Q_{0h}) e coeficientes ZIP (p_Z, p_I, p_P, q_Z, q_I e q_P), bem como os elementos da matriz de admitâncias (Y_h^v). Assim, considerando os parâmetros já determinados, a representação da carga pode ser realizada utilizando as Equações de 19 a 23. Através da Equação 19 é possível determinar a estimativa das componentes harmônicas da potência aparente complexa da carga modelada S_{Lh}. Este cálculo é realizado a partir das componentes harmônicas da tensão aplicada sobre a carga V_h para cada ordem harmônica h. Com os valores estimados de S_{Lh} e as tensões V_h é possível determinar, também, as estimativas das componentes harmônicas da corrente da carga por $I_h = (S_{Lh} / V_h)^*$ para cada ordem harmônica h. Assim, a corrente da carga em função do tempo t, considerando somente N componentes harmônicas, é dada pela Equação 73.

$$i(t) = \sqrt{2} \sum_{h=1}^{N} |I_h| \sin(h\omega t + \phi_h) \tag{73}$$

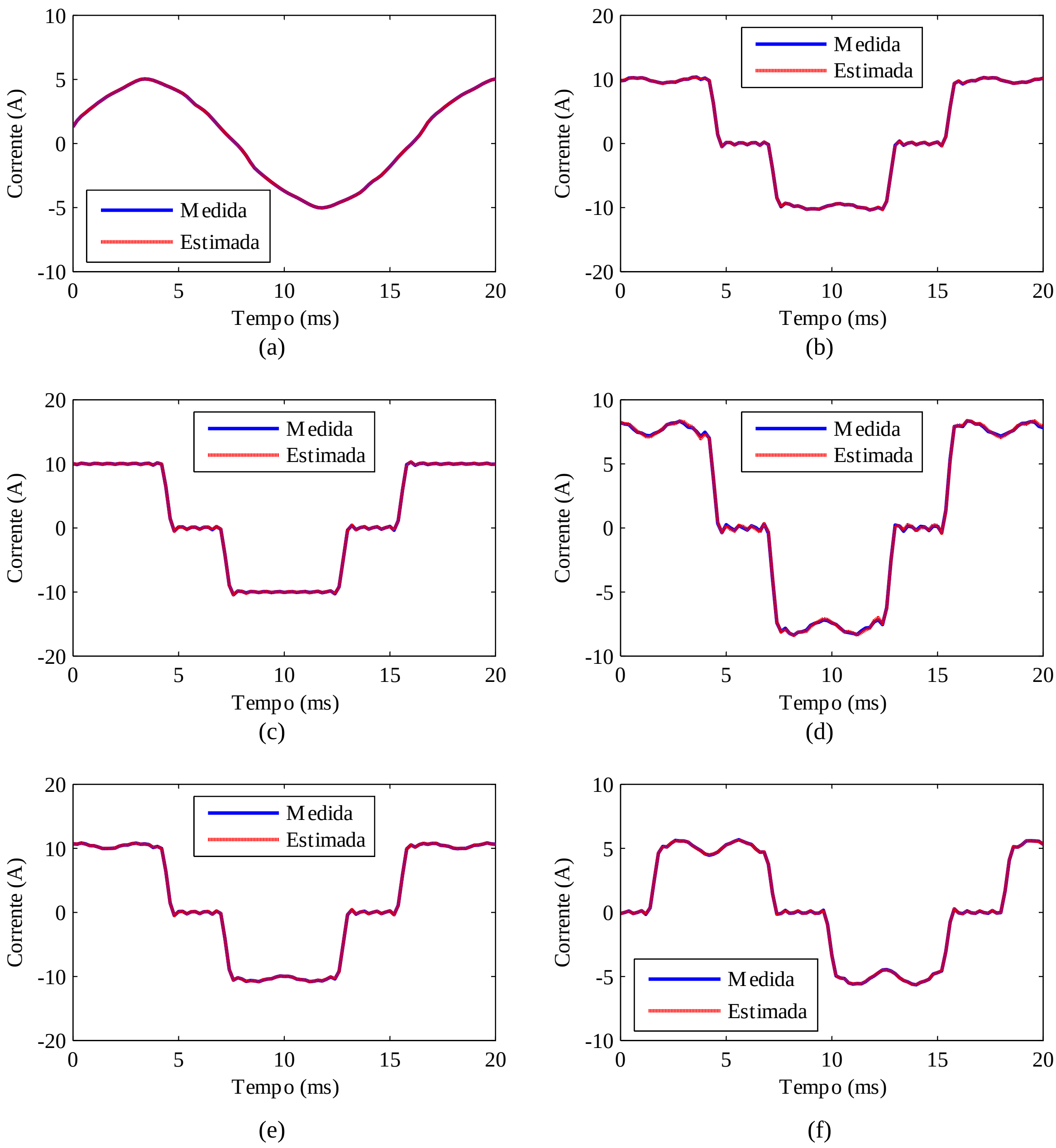
onde $|I_h|$ e ϕ_h são o valor eficaz e o ângulo da componente I_h da corrente da carga, respectivamente; e $\omega = 2\pi f$. Para estes estudos de caso f é igual a 60 Hz e N é igual a 25.

Utilizando os parâmetros obtidos no processo de estimação é possível validar a representação das cargas avaliadas comparando-se os dados de validação com as respostas fornecidas pelo modelo. Uma maneira de verificar a proximidade entre um valor estimado e medido da corrente da carga é através da comparação dos gráficos das formas de onda destas correntes. A diferença entre as formas de onda da corrente medida e estimada é um erro de corrente, cujo valor eficaz pode fornecer um indicativo do distanciamento entre estas curvas. Assim, para cada amostra dos dados de validação, o valor eficaz deste erro de corrente foi determinado em relação ao valor eficaz da corrente medida. Este erro relativo foi utilizado para identificar o pior caso de estimação entre os dados de validação. Assim, o caso que apresentou o maior erro relativo de corrente foi considerado mais desfavorável. Desta maneira, as formas de onda, de aproximadamente um período, das correntes cujas amostras apresentaram o maior erro relativo podem ser vistas no Gráfico 3 para todas as cargas avaliadas. Estas formas de onda foram reconstituídas a partir das componentes harmônicas até a 25ª ordem, como descrito pela Equação 73. As magnitudes e os ângulos medidos e estimados desta mesma amostra da corrente das cargas avaliadas estão apresentados no Gráfico 4. Este gráfico permite a comparação entre as magnitudes e ângulos das correntes harmônicas medidas e estimadas.

Os módulos dos erros entre os valores medidos e estimados das potências ativa e reativa, em relação à potência aparente medida, podem ser visualizados no Gráfico 5. As potências ativa e reativa da carga são determinadas pelas correntes e tensões medidas dos dados de validação e as respectivas potências ativa e reativa estimadas são obtidas pelo modelo.

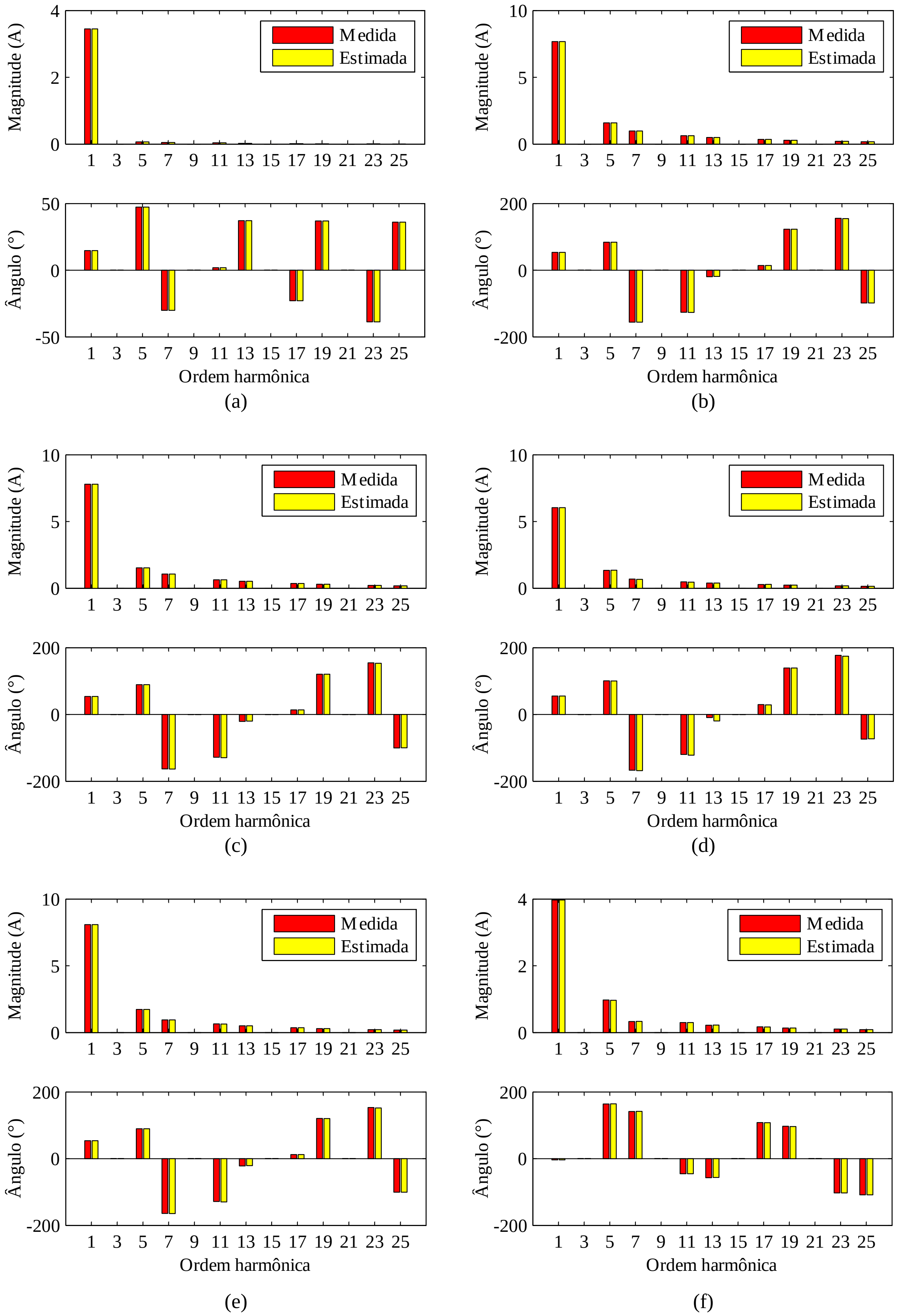
Observando-se o Gráfico 3 e o Gráfico 4 é possível verificar que, para todas as cargas avaliadas, as correntes estimadas são muito próximas das correntes medidas, mesmo considerando o pior caso entre as amostras dos dados de validação. Isto pode ser observado tanto nas formas de onda do Gráfico 3 quanto nas magnitudes e ângulos das componentes harmônicas de corrente do Gráfico 4. Além disso, é possível visualizar no Gráfico 5 que, para todas as cargas avaliadas, os módulos dos erros relativos das correntes são menores que 0,22%, mesmo para o caso da carga experimental, com a presença de ruídos de medição.

Gráfico 3 – Formas de onda da corrente para diferentes cargas:
(a) Carga I; (b) Carga II; (c) Carga III; (d) Carga IV; (e) Carga V; (f) Carga VI.



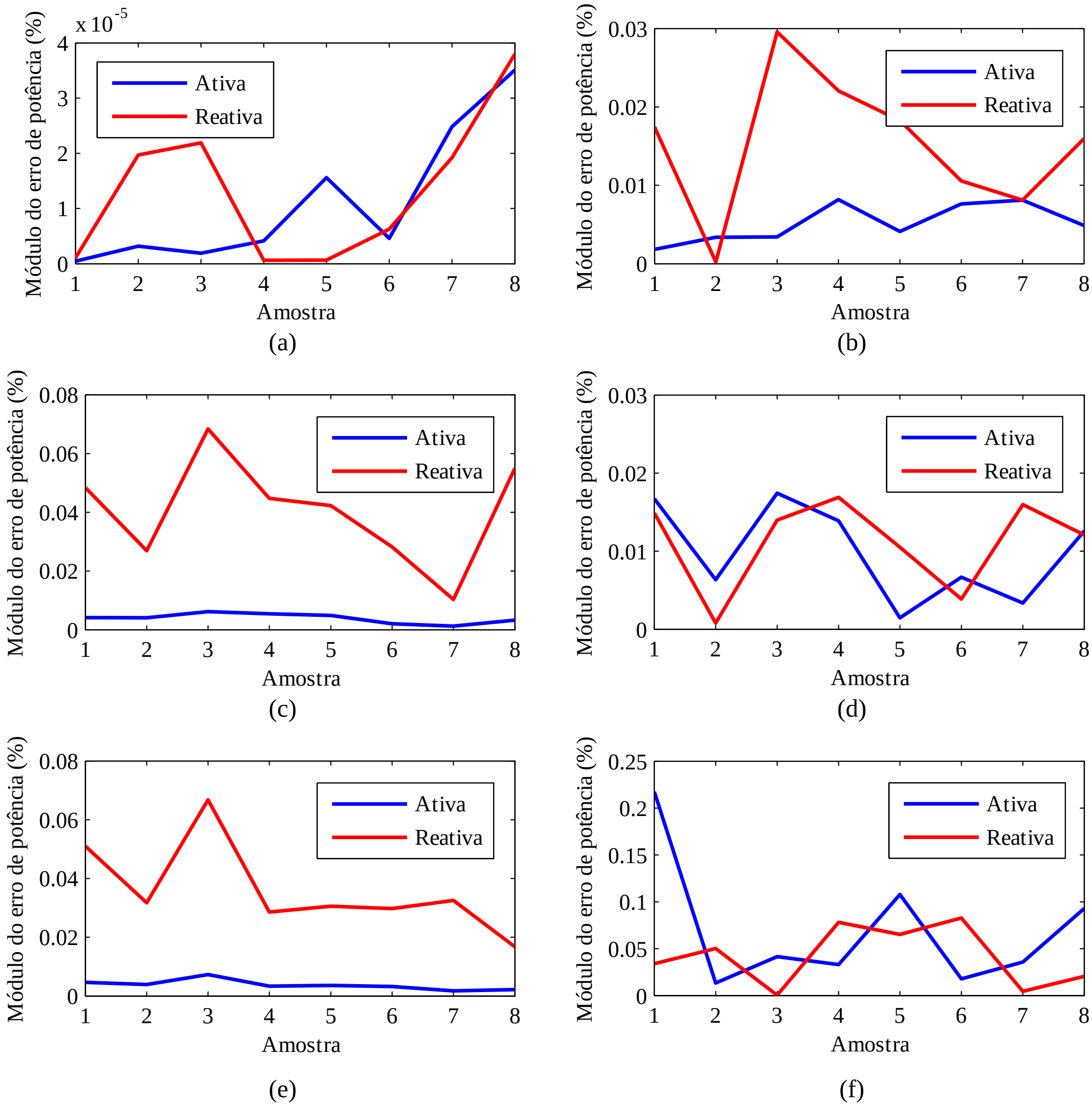
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 4 – Magnitudes e ângulos da corrente medida e estimada para diferentes cargas: (a) Carga I; (b) Carga II; (c) Carga III; (d) Carga IV; (e) Carga V; (f) Carga VI.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 5 – Módulos dos erros relativos entre os valores medidos e estimados das potências ativa e reativa das cargas: (a) Carga I; (b) Carga II; (c) Carga III; (d) Carga IV; (e) Carga V; (f) Carga VI.



Fonte: Elaborado pelo autor.

É possível observar que os valores encontrados para os coeficientes do modelo ZIP da Carga I são compatíveis com esta carga linear. Na Tabela 1 os valores de p_Z e q_Z são iguais a 1 e os demais coeficientes são iguais a 0, indicando que a carga é de impedância constante. Outro resultado importante para a Carga I é que os valores das magnitudes das admitâncias desta carga linear, mostrados no Gráfico 2a, são reduzidos e indicam que o acoplamento entre tensões e correntes harmônicas é insignificante. De forma complementar, os valores das potências harmônicas da Carga I, descritos na Tabela 3, também são reduzidos, indicando que somente o modelo ZIP poderia fornecer uma boa representação para este tipo de carga.

Os valores em negrito na Tabela 1 destacam que a estimativa para os coeficientes do modelo ZIP são compatíveis com o tipo de carga analisada. Isto ocorreu mesmo no caso da Carga V, em que cada retificador alimentava uma carga distinta, de impedância constante, de corrente constante e de potência constante. Neste caso, os coeficientes ZIP da potência ativa assumem valores próximos, já que as amplitudes das correntes destes retificadores são aproximadamente iguais.

É possível verificar que os valores estimados para as admitâncias das cargas eletrônicas de II a VI, mostrados no Gráfico 2, indicam o acoplamento entre diversas ordens harmônicas de tensão em uma dada ordem harmônica de corrente. Desta forma, somente o modelo ZIP não representaria satisfatoriamente esta cargas. Nestes casos, as componentes fundamentais de potência, e consequentemente as correntes fundamentais, são afetadas por tensões de várias ordens harmônicas. As demais ordens harmônicas da potência da carga são pouco influenciadas pelas tensões harmônicas, exceto pela componente de ordem 23, que apresenta alguma contribuição nas Cargas de II a V. Adicionalmente, as correntes de ordem superior à fundamental da Carga IV também são afetadas pela 13ª ordem harmônica da tensão.

3.4 Conclusão

Este capítulo apresentou uma nova modelagem harmônica para cargas, baseada no modelo ZIP e no acoplamento harmônico por matriz de admitância. Além disso, uma metodologia para a determinação dos parâmetros foi discutida. Vários estudos de caso foram apresentados, onde foi possível constatar a elevada exatidão do modelo para as cargas avaliadas.

Para representações contendo mais de 3 ordens harmônicas, o modelo proposto utiliza menos parâmetros em relação à quantidade de parâmetros do modelo de Norton harmonicamente acoplado. O método proposto para a estimação dos parâmetros procura fornecer informações físicas sobre a carga, buscando coeficientes ZIP restritos a uma faixa que permita sua interpretação física. Como discutido anteriormente, o método de regressão múltipla poderia ser utilizado para se obter os parâmetros da parte fundamental do modelo, porém assim não seria possível estabelecer limites para os coeficientes ZIP. Para as cargas avaliadas, foi possível observar o baixo valor do erro de estimação da potência, provocado pela limitação dos coeficientes.

Para situações em que a carga varia ao longo do tempo, pode-se realizar sua modelagem em intervalos de tempo em que a demanda pode ser considerada aproximadamente constante. Por exemplo, a carga de um consumidor foi considerada constante em intervalos de uma hora. Assim, a cada hora é necessário obter os dados para a realização do processo de estimação dos parâmetros do modelo. Medições realizadas ao longo de vários dias podem auxiliar na obtenção das características típicas da carga em um intervalo de tempo específico (ALMEIDA, 2012).

Entre os testes efetuados, a avaliação dos parâmetros obtidos para uma dada carga permitiu determinar se a mesma é linear ou não linear. Neste caso, são avaliados os coeficientes ZIP obtidos e magnitudes estimadas para a matriz de admitância. Baixos valores destas magnitudes indicam que a carga pode ser caracterizada basicamente pela parcela polinomial do modelo, podendo ser representada apenas por termos de impedância, corrente e potência constante. Além disso, mesmo no caso de cargas não lineares, como o retificador trifásico de onda completa a diodo, foi possível determinar se a carga alimentada por ele era do tipo impedância, corrente ou potência constante. Esta análise pode ajudar a caracterizar a carga ou conjunto de cargas, mostrando sua contribuição para a distorção da tensão e corrente no sistema.

Os métodos para determinação de parâmetros discutidos em Brunoro, Encarnação e Fardin (2016b) e Brunoro, Encarnação e Fardin (2017) são diferentes do método apresentado neste capítulo. Em Brunoro, Encarnação e Fardin (2016b) o método de regressão utilizado para determinar os parâmetros não limitou a faixa de valores dos coeficientes ZIP. Porém, para as cargas avaliadas neste artigo, a interpretação física destes coeficientes foi possível, já que os seus valores estimados não ultrapassaram significativamente os limites entre 0 e 1. Em Brunoro, Encarnação e Fardin (2017) foi proposta uma metodologia para determinar os limites mínimo e máximo das potências iniciais P_{01} e Q_{01}, os quais foram utilizados na busca exaustiva. Porém, no presente capítulo, tal metodologia foi substituída pela regressão linear, durante o processo de busca exaustiva. Tal mudança é vantajosa, pois reduz o tempo de busca dos parâmetros e eleva a precisão do modelo, já que a discretização dos valores das potências inicias não é mais necessária.

4 PROPOSTA DE MODELO CONSIDERANDO CIRCUITO EQUIVALENTE E ACOPLAMENTO HARMÔNICO POR MATRIZ DE CORRENTES

Conforme descrito na Seção 2.2, várias abordagens consideram os efeitos harmônicos em estudos do comportamento de cargas. O modelo de fontes de corrente constante, o modelo de Norton, o modelo de matriz de admitância harmonicamente acoplada e o modelo de Norton harmonicamente acoplado estão entre os principais modelos aplicados. O modelo de Norton não considera o acoplamento entre tensões e correntes de diferentes frequências harmônicas. Entretanto, como discutido nas Seções 1.2 e 2.2.4, a exatidão dos resultados do modelo pode ser melhorada considerando o efeito de acoplamento, como no caso do modelo de Norton harmonicamente acoplado.

Neste contexto, este capítulo propõe uma modelagem que considera o acoplamento harmônico entre grandezas elétricas presentes na carga, sendo escolhido o método dos mínimos quadrados para a identificação dos parâmetros do modelo (BRUNORO; ENCARNAÇÃO; FARDIN, 2016c).

4.1 Modelo Proposto

O modelo proposto foi concebido baseado no atendimento aos seguintes requisitos:

- Caracterizar a carga considerando elementos de impedância constante, potência constante e corrente constante, devido à presença de cargas com tais características no sistema;
- Conter estrutura baseada em circuito, visando sua implementação em simuladores;
- Considerar variações de tensão das diversas componentes harmônicas sobre a carga;
- Promover o acoplamento harmônico entre várias componentes de tensão em uma determinada componente de corrente da carga;
- Utilizar variáveis de entrada linearmente independentes;
- Conter uma quantidade de parâmetros similar a de outros modelos harmonicamente acoplados;

- Permitir estudos que revelam as componentes harmônicas de tensão que afetam uma determinada componente de corrente da carga;
- Ser flexível de modo a admitir sua adequação para diferentes tipos de cargas.

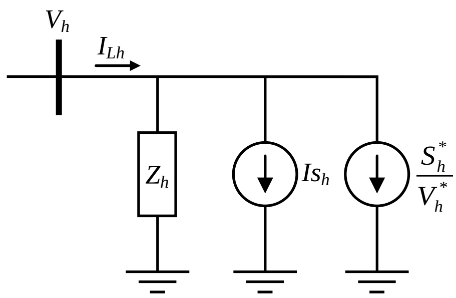
Há influência de várias componentes harmônicas de tensão em uma dada componente harmônica da corrente na carga, e os modelos que consideram este acoplamento obtêm melhores resultados em relação aqueles que não consideram tal efeito. Assim, a modelagem proposta neste capítulo, utiliza uma impedância constante Z em paralelo com fontes de correntes harmônicas, cada uma controlada por tensões de diversas ordens harmônicas, além de uma parcela de potência aparente constante para cada ordem harmônica. É importante ressaltar que a parte imaginária da impedância Z é modificada em função da frequência da tensão aplicada. Supondo que a tensão da carga contenha várias componentes harmônicas, a parte imaginária da impedância Z se torna diferente para cada ordem harmônica, como estabelecido pela Equação 74, onde Z_h é o valor da impedância Z para a ordem harmônica h.

$$Z_h = \begin{cases} R + jhX & \text{para } X \geq 0 \\ R + jX/h & \text{para } X < 0 \end{cases} \tag{74}$$

onde a parte real e a parte imaginária da impedância Z_h, para h igual a 1, são iguais a R e X, respectivamente.

A Figura 6 mostra o circuito equivalente, por fase, do modelo proposto para a ordem harmônica h, onde V_h e I_{Lh} são componentes harmônicas da tensão e da corrente da carga, respectivamente; Z_h é uma impedância descrita pela Equação 74; Is_h é a componente harmônica da corrente, de ordem h, da fonte de corrente; e S_h é o termo de potência constante de ordem h. Neste caso, apesar da injeção harmônica ser tipicamente representada por correntes que fluem da carga para o sistema, preferiu-se adotar o mesmo referencial da corrente fundamental para as componentes harmônicas de ordem superior.

Figura 6 – Modelo proposto de carga de ordem harmônica *h*.



Fonte: Elaborada pelo autor.

No modelo proposto, para cada fase, a componente harmônica de ordem *h* da potência aparente da carga pode ser obtida pela Equação 75, considerando *N* ordens harmônicas.

$$S_{Lh} = V_h I_{Lh}^* = \frac{|V_h|^2}{Z_h^*} + \sum_{v=1}^{N} |V_v| I_h^v + S_h \tag{75}$$

onde $|V_h|$ e $|V_v|$ são as magnitudes das componentes harmônicas da tensão da carga de ordem *h* e *v*, respectivamente; Z_h^* é o conjugado complexo da impedância Z_h representada pela Equação 74; I_h^v é uma corrente com módulo e ângulo constante, sendo o somatório presente na Equação 75 igual à potência aparente da fonte de corrente Is_h; e S_h é o termo de potência aparente constante para a ordem harmônica *h*.

Portanto, os parâmetros que deverão ser estimados, nesta proposta, são: *R*, *X*, S_h e I_h^v para cada *h* e *v* assumindo valores inteiros de 1 até *N*.

4.2 Determinação de Parâmetros do Modelo

Considerando a estratégia baseada em medições, para identificar os parâmetros do modelo proposto neste capítulo, foi utilizado o método dos mínimos quadrados. Conforme discutido na Seção 3.2, este método necessita de um conjunto de medições que represente diferentes condições de operação, as quais se deseja modelar, e assim garantir a independência linear do sistema de equações.

Nos casos onde as amplitudes das tensões harmônicas medidas são iguais zero ou muito próximas deste valor, a modelagem da carga deve desconsiderar tal componente harmônica. Isto reduz a quantidade de componentes harmônicas consideradas no modelo, simplificando o processo de determinação dos parâmetros e necessitando de menor quantidade de pontos medidos.

A quantidade de amostras do processo de estimação dos parâmetros deve ser maior do que a quantidade de parâmetros estimados. Portanto, a quantidade M de medidas deve ser maior do que a quantidade de componentes harmônicas consideradas no modelo mais dois. Uma vez que cada linha da matriz de correntes harmonicamente acopladas contém N elementos, ou seja, um elemento para cada componente harmônica considerada no modelo. Os dois parâmetros adicionais são referentes à impedância constante Z e a potência aparente constante S_h para a ordem harmônica a ser estimada.

A determinação da quantidade mínima de amostras consideradas no modelo será exemplificada para duas situações em que há componentes a serem excluídas devido à reduzida magnitude de suas tensões. A primeira situação é para o caso em que as componentes de ordem par devem ser excluídas, restando apenas as componentes de ordem ímpar. Assim, a quantidade de medidas M que deve ser coletada para a construção do sistema de equações deve atender a relação $M > M_{odd}$, com M_{odd} definido pela Equação 76. A segunda situação é para o caso em que as componentes pares e múltiplas de três são desconsideradas no modelo. Portanto, para o caso que considera apenas as componentes ímpares não múltiplas de três a quantidade de medidas M, que deve ser coletada, é descrita por $M > M_{pos}$, com M_{pos} definido pela Equação 77. Em todos os casos a quantidade de amostras M deve ser um valor inteiro. As Equações 76 e 77 foram obtidas considerando que as sequências de ordens harmônicas exemplificadas podem ser descritas por progressões aritméticas.

$$M_{odd} = \frac{N+5}{2} \tag{76}$$

$$M_{pos} = \frac{2N+15-(-1)^N}{6} \tag{77}$$

onde N é a maior ordem harmônica considerada no modelo.

Inicialmente devem ser identificados os parâmetros relacionados à componente fundamental e para continuar a determinação dos parâmetros do modelo deve-se considerar o valor de Z_1 já encontrado. Com o valor da impedância Z_1 é possível determinar R e X, considerando h igual a 1 na Equação 74. Com estes resultados pode-se determinar, pela mesma equação, a impedância Z_h para cada componente harmônica de ordem h. As duas etapas para identificação dos parâmetros do modelo estão descritas nas Seções 4.2.1 e 4.2.2. Na primeira etapa os parâmetros do modelo para a componente fundamental podem ser estimados, sendo eles: Z_1, S_1 e $I_1^1, I_1^2, I_1^3, \cdots, I_1^N$. Na segunda etapa os parâmetros do modelo podem ser estimados considerando os valores de R e X já obtidos na primeira etapa. São determinados, nesta etapa, os seguintes parâmetros para cada ordem harmônica h de 1 a N: S_h e $I_h^1, I_h^2, I_h^3, \cdots, I_h^N$.

4.2.1 Determinação de Parâmetros da Componente Fundamental

A representação matricial da Equação 75, como um sistema sobredeterminado, para a fundamental com M medidas está apresentada na Equação 78.

$$\begin{bmatrix} S_{L1}^1 \\ S_{L1}^2 \\ \vdots \\ S_{L1}^M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left|V_1^1\right|^2 & \left|V_1^1\right| & \left|V_2^1\right| & \cdots & \left|V_N^1\right| & 1 \\ \left|V_1^2\right|^2 & \left|V_1^2\right| & \left|V_2^2\right| & \cdots & \left|V_N^2\right| & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \left|V_1^M\right|^2 & \left|V_1^M\right| & \left|V_2^M\right| & \cdots & \left|V_N^M\right| & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1/Z^* \\ I_1^1 \\ I_1^2 \\ \vdots \\ I_1^N \\ S_1 \end{bmatrix} + \mathbf{E}_1 \tag{78}$$

onde $\mathbf{E}_1$ é o vetor de erros devido ao processo de medição e de modelagem; e Z é igual a Z_1, cuja parte real é igual a R e a parte imaginária é igual a X. A m-ésima medida da componente fundamental da potência aparente da carga S_{L1}^m foi determinada a partir da medida m da componente fundamental da tensão e da corrente da carga, como descrito pela Equação 75.

A Equação 78 pode ser reescrita como apresentado pela Equação 79.

$$\mathbf{y}_1 = \boldsymbol{\varphi}_1 \cdot \hat{\boldsymbol{\theta}}_1 + \mathbf{E}_1 \tag{79}$$

onde $\mathbf{y}_1$ é o vetor de potências aparentes; $\boldsymbol{\varphi}_1$ é a matriz de observação; e $\hat{\boldsymbol{\theta}}_1$ é o vetor de parâmetros. O símbolo ^ indica que a variável é uma estimativa.

A estimativa do vetor de parâmetros é descrita pela Equação 80. Desta forma todos os parâmetros do modelo, para a componente fundamental, podem ser encontrados. Conforme discutido na Seção 3.2.2, para este sistema também foi utilizada uma transformação de dados, como descrito no APÊNDICE B. Neste caso, foi empregada a metodologia para sistemas com termo independente.

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_1 = \left[\boldsymbol{\varphi}_1^T \cdot \boldsymbol{\varphi}_1\right]^{-1} \cdot \boldsymbol{\varphi}_1^T \cdot \mathbf{y}_1 \tag{80}$$

4.2.2 Determinação de Parâmetros das Componentes Harmônicas de Ordem Superior à Fundamental

Para determinar os parâmetros do modelo deve-se considerar o valor de Z já encontrado, conforme descrito na Seção 4.2.1. Com este valor é possível determinar R e X, e assim determinar Z_h pela Equação 74. Para a ordem harmônica h, superior à fundamental, pode-se escrever matricialmente a Equação 75, para M medidas, como estabelecido pela Equação 81.

$$\begin{bmatrix} S_{Lh}^1 - \dfrac{\left|V_h^1\right|^2}{Z_h^*} \\ S_{Lh}^2 - \dfrac{\left|V_h^2\right|^2}{Z_h^*} \\ \vdots \\ S_{Lh}^M - \dfrac{\left|V_h^M\right|^2}{Z_h^*} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left|V_1^1\right| & \left|V_2^1\right| & \cdots & \left|V_N^1\right| & 1 \\ \left|V_1^2\right| & \left|V_2^2\right| & \cdots & \left|V_N^2\right| & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \left|V_1^M\right| & \left|V_2^M\right| & \cdots & \left|V_N^M\right| & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_h^1 \\ I_h^2 \\ \vdots \\ I_h^N \\ S_h \end{bmatrix} + \mathbf{E}_h \tag{81}$$

onde $\mathbf{E}_h$ é um vetor de erros de ordem h devido ao processo de medição e de modelagem.

A Equação 81 pode ser reescrita como apresentado na Equação 82.

$$\mathbf{y}_h = \boldsymbol{\varphi} \cdot \hat{\boldsymbol{\theta}}_h + \mathbf{E}_h \tag{82}$$

Considerando todas as ordens harmônicas superiores à fundamental, com $h = 2, \ldots, N$, é possível escrever a matriz de potências, a matriz de parâmetros do modelo e a matriz de erros conforme descrito pelas Equações 83, 84 e 85, respectivamente.

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_2 & \mathbf{y}_3 & \cdots & \mathbf{y}_N \end{bmatrix} \tag{83}$$

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{\theta}}_2 & \hat{\boldsymbol{\theta}}_3 & \cdots & \hat{\boldsymbol{\theta}}_N \end{bmatrix} \tag{84}$$

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_2 & \mathbf{E}_3 & \cdots & \mathbf{E}_N \end{bmatrix} \tag{85}$$

Assim, as estimativas dos parâmetros para todas as ordens harmônicas superiores à fundamental são determinadas por regressão, a partir das Equações de 82 a 85, conforme descrito pela Equação 86. Neste caso, foi utilizada a metodologia para transformação de dados em sistemas com termo independente, como descrito no APÊNDICE B.

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = \left[\boldsymbol{\varphi}^T \cdot \boldsymbol{\varphi}\right]^{-1} \cdot \boldsymbol{\varphi}^T \cdot \mathbf{y} \tag{86}$$

4.2.3 Seleção de dados

Para este modelo, a escolha dos dados utilizados no processo de estimação dos parâmetros é similar aos critérios de seleção descritos na Seção 3.2.3. Assim, durante a seleção dos dados para o processo de estimação deve-se:

- Eliminar componentes harmônicas de tensão cujas magnitudes são próximas de zero. No entanto, a eliminação de uma ordem harmônica não deve provocar redução significativa na *DTT*%. Assim, foi adotado que uma ordem harmônica poderá ser eliminada caso a *DTT*% média, sem esta harmônica, não apresente redução superior a 0,5% da *DTT*% média, considerando todas as ordens harmônicas até N, que é a maior ordem harmônica considerada no modelo;

- Determinar a quantidade de amostras para que o sistema seja sobredeterminado. Desta forma, a quantidade de amostras M deve ser superior ao número de harmônicas consideradas no modelo. Para o caso em que as harmônicas de ordem par são eliminadas é necessário que $M > M_{odd}$, onde M_{odd} é descrito pela Equação 76. Para o caso em que somente as ordens harmônicas ímpares não múltiplas de 3 são consideradas é necessário que $M > M_{pos}$, onde M_{pos} é descrito pela Equação 77. Quanto mais ruidoso for o conjunto de dados maior deve ser a quantidade de amostras;

- Examinar se os dados de estimação representam diferentes condições de operação do sistema. A concentração de dados de estimação, em determinados pontos de sua faixa de variação pretendida, pode indicar pouca diversidade de condições de operação. Isto pode acarretar na obtenção de parâmetros que satisfazem apenas uma região da faixa de operação pretendida. Para evitar este fato e considerar a quantidade de parâmetros, a faixa de variação da tensão fundamental sobre a carga a ser modelada foi dividida em uma quantidade de partes igual ao número de componentes harmônicas consideradas no modelo mais dois, onde cada parte deverá conter pelo menos uma amostra. Para situações em que os dados são ruidosos deve-se considerar a necessidade de mais amostras em cada faixa de variação da tensão;

- Avaliar se as matrizes de observação têm posto pleno de colunas. Neste caso, o posto da matriz deve ser igual à quantidade de parâmetros a serem estimados. Desta forma, é possível garantir que as colunas da matriz de observação são linearmente independentes;

- Verificar se a *DTT*% da tensão sobre a carga não é superior a 10%, conforme sugerido por Ndiay e outros (2007) e estabelecido como limite máximo por ANEEL (2017). Assim, pretende-se evitar problemas de não linearidades devido a valores de tensão com distorções harmônicas muito elevadas.

4.3 Estudos de Caso e Resultados

Diferentes tipos de cargas foram modeladas, visando aplicar o modelo proposto, validar a metodologia para identificar seus parâmetros e mostrar sua flexibilidade na representação de cargas com características distintas. A modelagem foi delimitada numa faixa de variação aproximadamente igual a ± 3% da tensão fundamental sobre as cargas.

A fim de obter os dados necessários ao processo de estimação e validação dos parâmetros destas cargas, estudos foram realizados utilizando simulador e circuito experimental. As cargas avaliadas foram do tipo motor de indução e cargas eletrônicas, bem como combinações destas cargas. Em todos estes casos a rede em que a carga foi conectada é representada por um circuito equivalente de Thévenin, composto por uma fonte de tensão com diversas componentes harmônicas e uma impedância equivalente do sistema, conforme já discutido na Seção 3.3.

4.3.1 Cargas Modeladas

A seguir estão listadas as cargas empregadas nos estudos de caso de acordo com a sua implementação. Note que a Carga VI é a mesma utilizada na modelagem descrita no Capítulo 3.

- Experimental
  - Carga VI: retificador trifásico a diodo com carga de impedância constante.
- *Software* de Simulação
  - Carga VII: motor de indução trifásico;
  - Carga VIII: Combinação em paralelo de um motor de indução trifásico com um retificador trifásico a diodo com carga de corrente constante;
  - Carga IX: Combinação em paralelo de dois retificadores trifásicos a diodo, um deles com cargas de impedância constante e o outro com carga de corrente constante.

As Cargas de VII a IX foram implementadas no *software* de simulação de transitórios eletromagnéticos PSCAD. Já a Carga VI foi construída e testada em laboratório. Os diagramas e os dados de todas as cargas avaliadas estão descritos no APÊNDICE C.

4.3.2 Equivalente de Rede

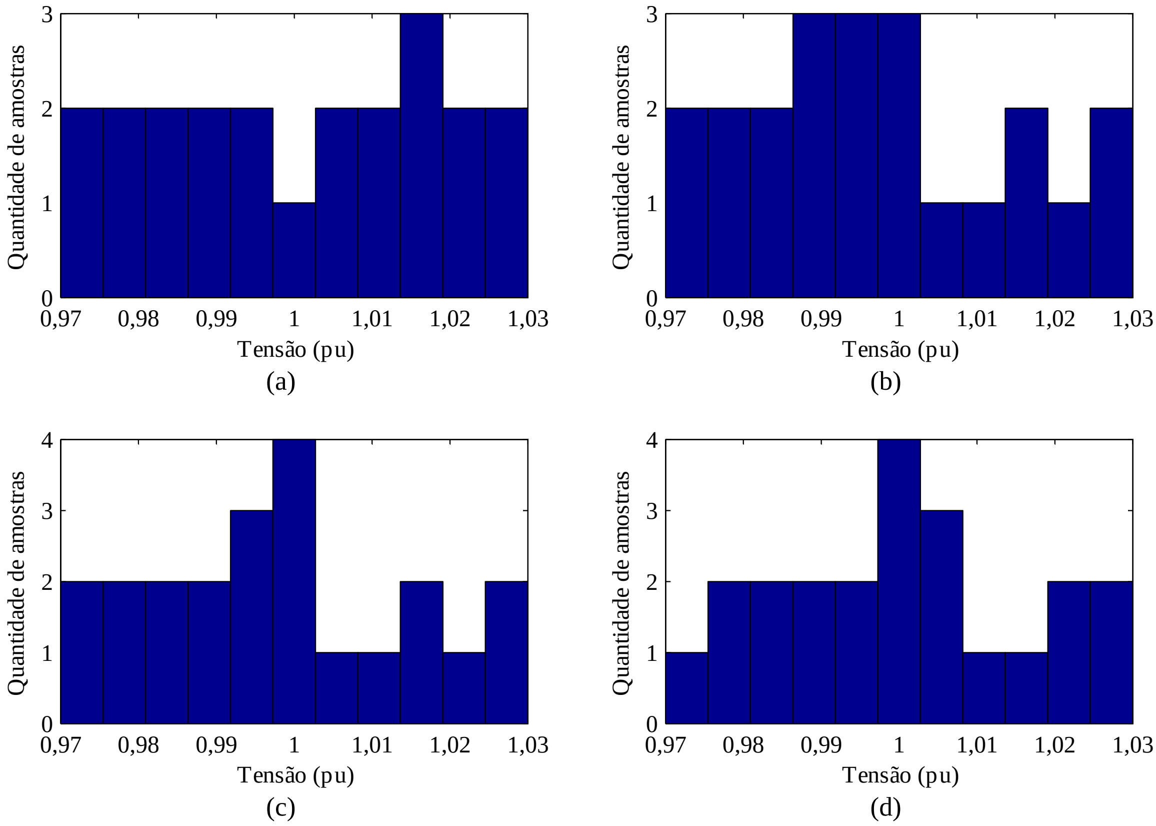
O circuito equivalente de rede utilizado para avaliar as Cargas de VII a IX está descrito na Seção 3.3.2.

4.3.3 Quantidade de Amostras e Seleção de Dados

Em todos os estudos de caso a modelagem para a representação das cargas foi realizada considerando até a 25ª ordem harmônica, ou seja, N igual a 25. Portanto, esta quantidade de ordens harmônicas foi considerada tanto na modelagem quanto nas medições para a coleta de dados.

Seguindo as recomendações da Seção 4.2.3 para a seleção dos dados de estimação, os valores das magnitudes das tensões harmônicas das cargas avaliadas foram examinados previamente. Assim, detectou-se que as componentes de ordem par e múltiplas de três não são relevantes devido ao seu valor reduzido e, portanto, devem ser excluídas da modelagem. Em todos os casos a DTT_I% na carga, que é calculada somente com as componentes ímpares não múltiplas de 3, não provocou redução superior a 0,5% da DTT%. Consequentemente, é possível utilizar a Equação 77 para determinar a quantidade mínima de amostras necessárias ao processo de estimação dos parâmetros do modelo. Para o valor de N, definido anteriormente igual a 25, têm-se que M_{pos} é igual a 11. Portanto, a quantidade de medidas deve ser um número inteiro maior do que o valor de M_{pos} calculado. Considerando que pode haver a presença de ruídos nas medições, devido ao método de medição empregado no estudo experimental e devido aos métodos de cálculo utilizados pelo simulador, adotou-se a quantidade de medidas M igual a 22 para a construção do sistema sobredeterminado do processo de estimação dos parâmetros do modelo. Nos testes realizados foram coletadas 31 amostras de tensão e corrente da carga. Aproximadamente 70% dos dados coletados, 22 amostras, foram utilizados no processo de estimação dos parâmetros e os demais dados, 9 amostras, foram utilizados no processo de validação do modelo. Os histogramas apresentados no Gráfico 6, mostram que os dados proporcionam diferentes condições de operação, já que há pelo menos uma amostra em cada segmento da faixa de variação da tensão na carga. Nestes histogramas, a tensão base de fase é igual a 99,4 V. A faixa de variação foi considerada igual a ± 3% em relação à tensão base, que é a faixa de variação de tensão na qual se deseja modelar a carga. Para todas as cargas avaliadas, os postos das matrizes de observação das Equações 79 e 82 são iguais a 11 e 10, respectivamente. Como estes valores correspondem à quantidade de colunas destas matrizes é possível constatar que suas colunas são linearmente independentes. A DTT% para todas as cargas avaliadas foi inferior a 10%.

Gráfico 6 – Histogramas das amostras de tensão fundamental para diferentes cargas:
(a) Carga VI; (b) Carga VII; (c) Carga VIII; (d) Carga IX.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando as Cargas de VII a IX, para determinar as componentes harmônicas de tensão e corrente da carga foi utilizada a FFT já disponível no *software* PSCAD. No caso experimental da Carga VI, o medidor de qualidade de energia Voltech modelo PM3000A foi utilizado para obter os valores de magnitude e ângulo das componentes harmônicas de tensão e corrente, em uma fase de entrada do retificador trifásico. O circuito foi considerado equilibrado e o modelo proposto aplicado em cada uma das fases do sistema. Em relação à captura de dados, utilizando o simulador e o medidor de qualidade de energia, foram considerados os mesmos critérios de amostragem discutidos na Seção 3.3.3.

4.3.4 Estimação dos Parâmetros do Modelo

O processo de identificação dos parâmetros do modelo proposto foi desenvolvido de acordo com o equacionamento descrito na Seção 4.2.

Considerando os dados de estimação, os parâmetros do modelo Z, I_h^v e S_h, para cada h e v assumindo os valores 1, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23 e 25, são obtidos a partir da Equação 80 e 86, sendo que para as demais ordens harmônicas os valores de I_h^v e S_h são considerados nulos. Assim, a parte real e a parte imaginária da impedância Z para as cargas avaliadas estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Parte real R e imaginária X da impedância Z.

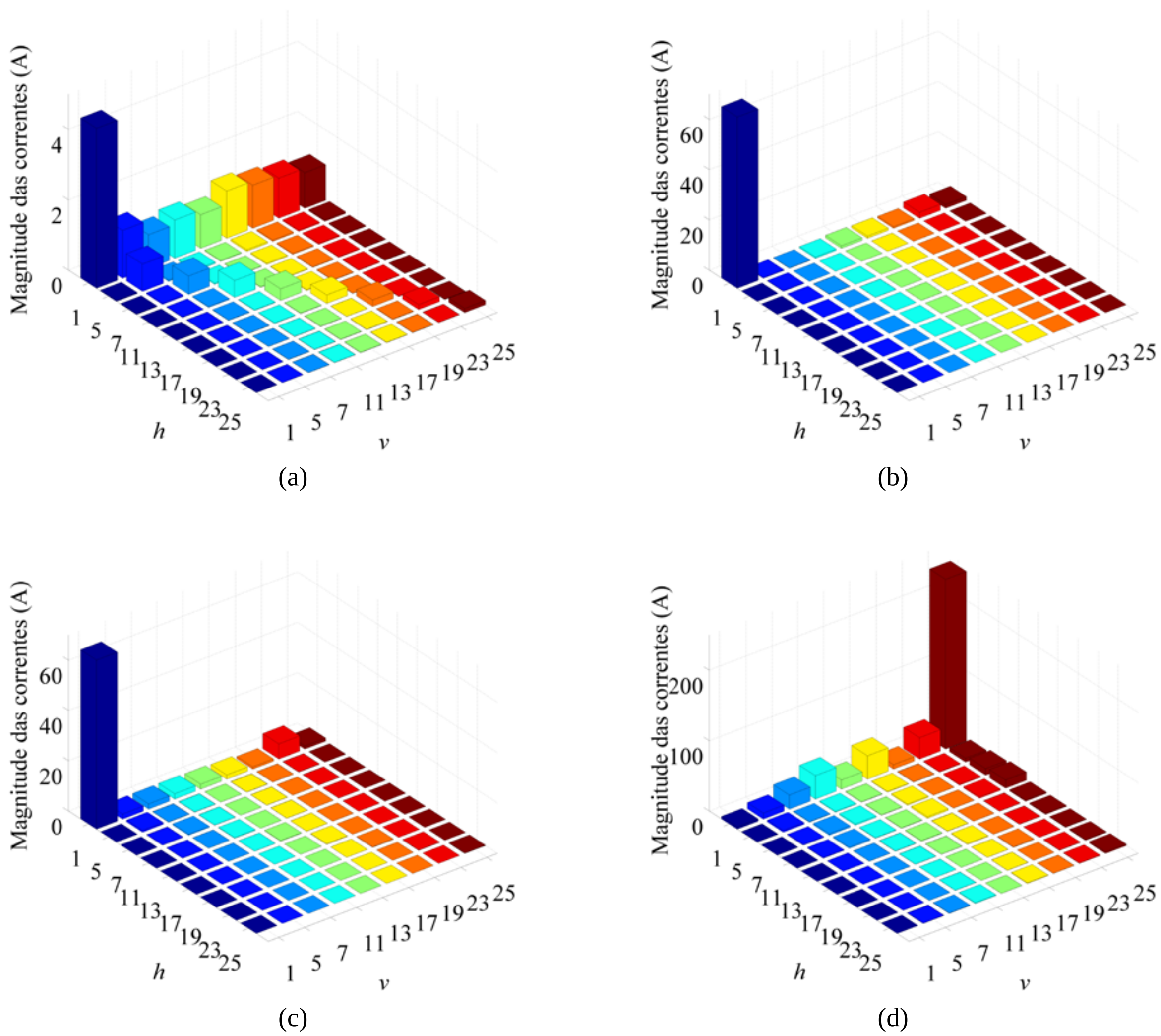
	Carga VI	**Carga VII**	**Carga VIII**	**Carga IX**
R (Ω)	16,192	0,307	0,314	12,718
X (Ω)	0,470	2,466	2,481	0,770

Os valores estimados das potências ativa P_h e reativa Q_h, da potência aparente S_h, estão apresentados na Tabela 5. As magnitudes das correntes estimadas I_h^v estão mostradas no Gráfico 7.

Tabela 5 – Valores da parte real e imaginária da potência aparente S_h.

h	**Carga VI**		**Carga VII**		**Carga VIII**		**Carga IX**	
	P_h (W)	**Q_h (VAr)**	**P_h (W)**	**Q_h (VAr)**	**P_h (W)**	**Q_h (VAr)**	**P_h (W)**	**Q_h (VAr)**
1	230,372	– 6,709	774,881	3175,447	779,710	3151,741	4,136	– 78,530
5	– 1,746	0,398	– 0,015	0,118	– 0,061	0,153	– 3,971	3,441
7	0,747	0,496	0,006	0,043	– 0,154	– 0,146	1,210	0,962
11	0,575	0,518	– 0,004	0,017	– 0,109	– 0,070	– 0,233	1,547
13	0,195	0,273	– 0,003	0,003	– 0,013	– 0,026	0,227	0,499
17	0,149	0,204	0,000	0,001	0,007	0,013	– 0,427	0,539
19	0,063	0,122	0,000	0,000	0,053	– 0,003	– 0,081	0,531
23	0,023	0,069	0,000	0,000	– 0,028	0,007	– 0,017	0,344
25	0,030	0,051	0,000	0,000	0,001	0,005	– 0,822	0,328

Gráfico 7 – Magnitudes das correntes estimadas para diferentes cargas:
(a) Carga VI; (b) Carga VII; (c) Carga VIII; (d) Carga IX.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O APÊNDICE D contém um exemplo com o passo a passo de utilização da metodologia para a determinação dos parâmetros do modelo proposto neste capítulo.

4.3.5 Resultados

Os estudos de caso das Cargas de VI a IX têm como objetivo aplicar o novo modelo proposto neste capítulo, bem como a metodologia para a obtenção dos seus parâmetros, visando as respectivas representações quando submetidas a tensões variáveis. De acordo com a metodologia apresentada anteriormente, para cada carga avaliada foram obtidos os valores dos seguintes parâmetros do modelo: impedância constante (Z), potências aparentes constantes S_h e os elementos da matriz de correntes (I_h^v). Assim, considerando os parâmetros já determinados a representação da carga pode ser realizada utilizando as Equações 74 e 75. Através da Equação 75 é possível determinar a estimativa das componentes harmônicas da potência aparente complexa da carga modelada S_{Lh}. Este cálculo é realizado a partir das componentes harmônicas da tensão aplicada sobre a carga V_h para cada ordem harmônica h. Com os valores estimados de S_{Lh} e as tensões V_h é possível determinar, também, as estimativas das componentes harmônicas da corrente da carga por $I_{Lh} = (S_{Lh} / V_h)^*$ para cada ordem harmônica h. O * indica conjugado complexo do valor calculado. Assim, a corrente da carga em função do tempo t, considerando somente N componentes harmônicas, é dada pela Equação 87.

$$i_L(t) = \sqrt{2}\sum_{h=1}^{N}\left|I_{Lh}\right|\sin\left(h\omega t + \phi_{Lh}\right) \tag{87}$$

onde $|I_{Lh}|$ e ϕ_{Lh} são o valor eficaz e o ângulo da componente I_{Lh} da corrente da carga, respectivamente; e $\omega = 2\pi f$. Para estes estudos de caso f é igual a 60 Hz e N é igual a 25.

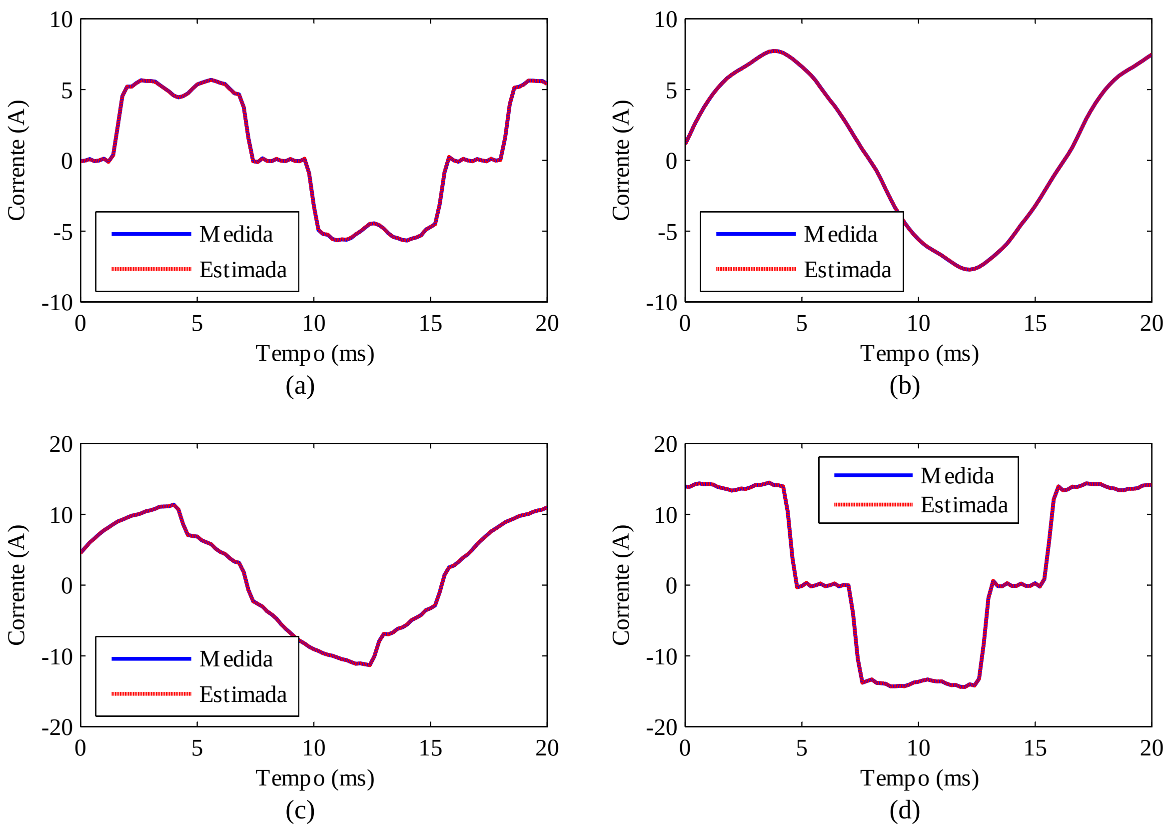
Utilizando os parâmetros obtidos é possível validar a representação das cargas avaliadas comparando-se os dados de validação com as respostas fornecidas pelo modelo. Uma forma de verificar a proximidade entre os valores medidos e estimados pelo modelo é através da superposição das formas de onda da corrente de carga medida e estimada, utilizando o conjunto de dados do processo de validação.

A diferença entre as formas de onda da corrente medida e estimada é um erro de corrente, cujo valor eficaz pode fornecer um indicativo do distanciamento entre estas curvas. Assim, para cada amostra dos dados de validação, o valor eficaz deste erro de corrente foi determinado em relação ao valor eficaz da corrente medida. Este erro relativo foi utilizado para identificar o pior caso de estimação entre os dados de validação. Assim, o caso que apresentou o maior erro relativo de corrente foi considerado mais desfavorável. Desta maneira, as formas de onda, de aproximadamente um período, das correntes cujas amostras apresentaram o maior erro relativo podem ser vistas no Gráfico 8 para todas as cargas avaliadas. Estas formas de onda foram reconstituídas a partir das componentes harmônicas até a 25ª ordem. As magnitudes e ângulos medidos e estimados desta mesma amostra da corrente de carga estão apresentados no Gráfico 9.

Os módulos dos erros entre os valores medidos e estimados das potências ativa e reativa, em relação à potência aparente medida, podem ser visualizados no Gráfico 10. As potências ativa e reativa da carga são determinadas pelas correntes e tensões medidas dos dados de validação e as respectivas potências ativa e reativa estimadas são obtidas pelo modelo.

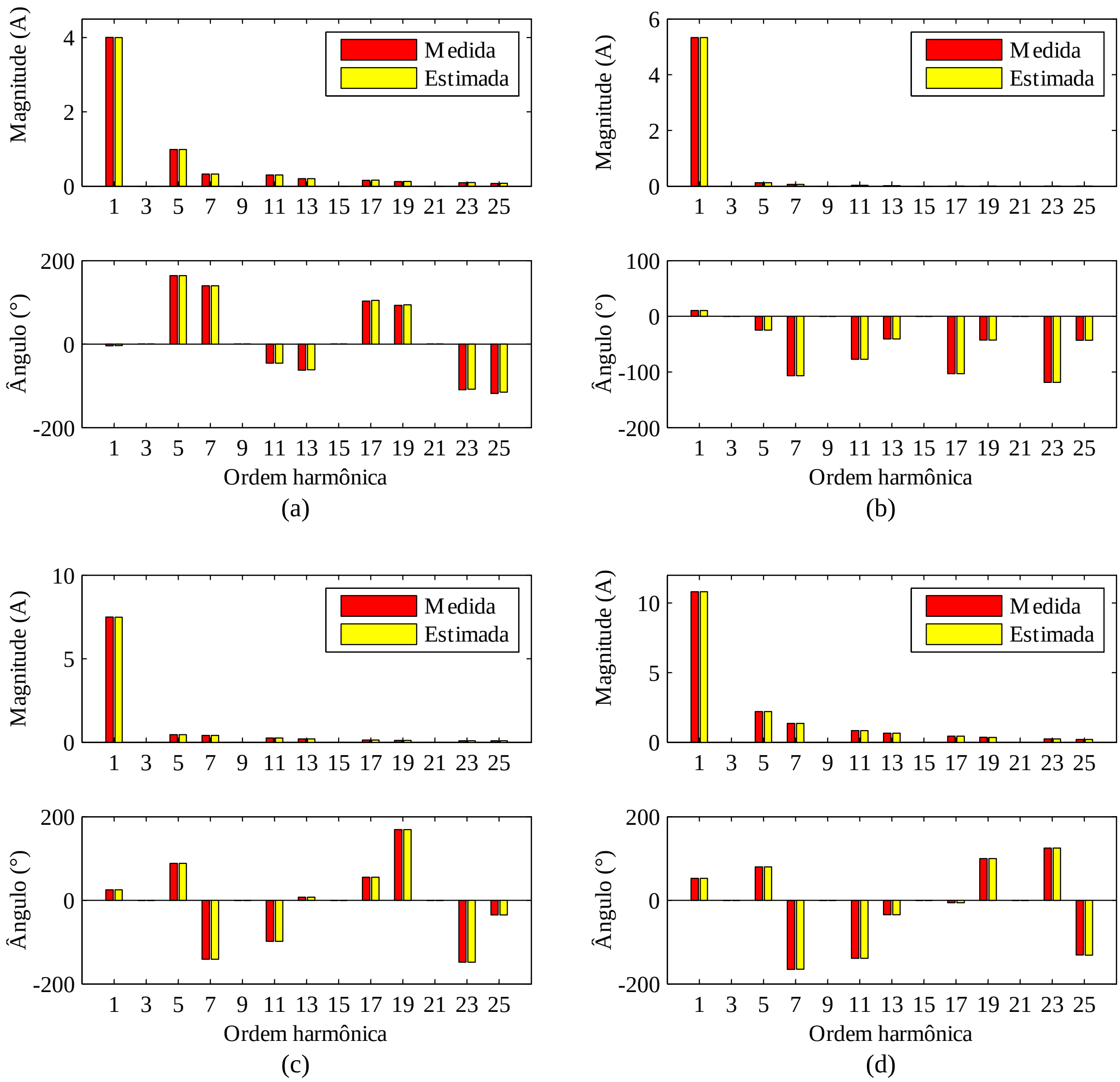
Observando-se o Gráfico 8 e o Gráfico 9 é possível verificar que, para todas as cargas avaliadas, as correntes estimadas são muito próximas das correntes medidas, mesmo considerando o pior caso entre as amostras dos dados de validação. Isto pode ser observado tanto nas formas de onda do Gráfico 8 quanto nas magnitudes e ângulos das componentes harmônicas de corrente do Gráfico 9.

Gráfico 8 – Formas de onda da corrente para diferentes cargas:
(a) Carga VI; (b) Carga VII; (c) Carga VIII; (d) Carga IX.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 9 – Magnitudes e ângulos da corrente medida e estimada para diferentes cargas:
(a) Carga VI; (b) Carga VII; (c) Carga VIII; (d) Carga IX.

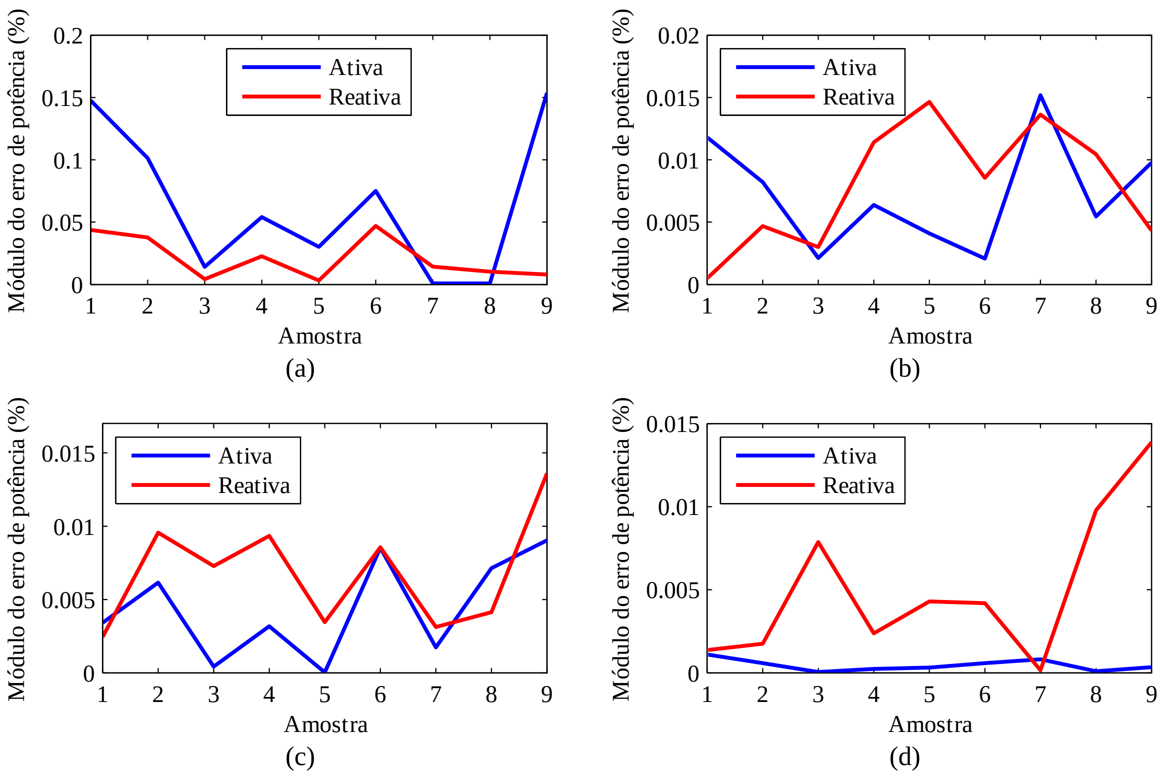


Fonte: Elaborado pelo autor.

Além disso, é possível visualizar no Gráfico 10 que, para todas as cargas avaliadas, os módulos dos erros relativos das correntes são menores que 0,16%, mesmo para o caso da carga experimental, com a presença de ruídos de medição.

É possível verificar que os valores das correntes das Cargas de VI a IX, mostrados no Gráfico 7, indicam o acoplamento entre diversas ordens harmônicas de tensão em uma dada ordem harmônica de corrente. Principalmente quando a carga é do tipo eletrônica.

Gráfico 10 – Módulos dos erros relativos entre os valores medidos e estimados das potências ativa e reativa das cargas: (a) Carga VI; (b) Carga VII; (c) Carga VIII; (d) Carga IX.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da análise dos parâmetros estimados para a Carga VII, que é um motor de indução, foi possível observar que há influência das tensões harmônicas na corrente fundamental, sendo as demais correntes influenciadas basicamente pela impedância Z_h. Neste caso, as potências aparentes S_h, com ordens superiores à fundamental, não influenciaram significativamente. Nas cargas eletrônicas é visível o acoplamento entre tensões e correntes de ordens harmônicas distintas, sendo as potências constantes de ordem superior à fundamental mais elevadas do que aquelas obtidas na avaliação do motor de indução.

4.4 Conclusão

Este capítulo apresentou uma nova modelagem harmônica para cargas, baseada em um elemento de impedância constante, um vetor de potências constantes e uma matriz de correntes harmonicamente acopladas. Além disso, uma metodologia para a determinação dos parâmetros foi discutida. Vários estudos de caso foram apresentados, considerando dados experimentais e de simulação.

Os resultados obtidos mostraram que o modelo proposto foi capaz de se adequar a quatro diferentes tipos de cargas, mediante o uso de conjuntos específicos de parâmetros. Estudos de cargas distintas, realizados em simulador e experimentalmente, mostraram que o modelo proposto foi capaz de representar tais cargas com elevada exatidão. Além disso, foi possível validar a metodologia proposta para identificar os parâmetros do novo modelo. O modelo foi capaz de representar cargas únicas como, por exemplo, um motor de indução e, também, cargas compostas que combinam diferentes cargas associadas em paralelo. Como a concepção deste modelo foi baseada em um circuito, contendo uma impedância constante e fontes de correntes controladas, sua implementação em simuladores é possível, podendo ajudar a determinar o comportamento harmônico das tensões e correntes no sistema de potência.

Este modelo possui um parâmetro a mais em relação ao modelo de Norton harmonicamente acoplado. Tal acréscimo na quantidade de parâmetros não é expressivo frente ao número total de parâmetros necessários para a representação de cargas com várias ordens harmônicas. Entretanto, devido à característica flexível do modelo, pode-se avaliar a eliminação de termos para simplificar sua implementação. Por exemplo, o processo de regressão pode ser realizado desconsiderando-se o vetor de potências constantes ou a matriz de correntes constantes. Se em algum destes casos a resposta do modelo for satisfatória, sua implementação ficará mais simples e a quantidade de parâmetros será consideravelmente menor.

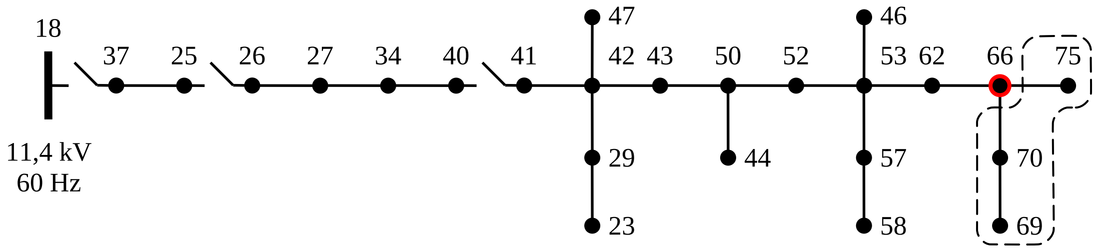
Assim como discutido na Seção 3.4, para situações em que a carga varia ao longo do tempo, pode-se realizar sua modelagem em intervalos de tempo em que a carga pode ser considerada aproximadamente constante.

5 APLICAÇÃO DO MODELO ZIP COM ACOPLAMENTO HARMÔNICO PROPOSTO EM UMA REDE RADIAL

5.1 Rede Radial para Estudo de Caso

Visando a aplicação da modelagem proposta em um sistema de distribuição, uma rede radial de 25 barras, contendo cargas harmônicas, foi implementada no simulador PSCAD. O diagrama unifilar da rede avaliada é mostrado na Figura 7, onde seus dados estão descritos no APÊNDICE E. Estes dados contêm as informações dos cabos e seus comprimentos nos segmentos de rede, as informações das impedâncias dos cabos utilizados no alimentador e a descrição das cargas, bem como a localização no sistema. A rede trifásica é equilibrada e sua tensão nominal de linha é igual a 11,4 kV com frequência de 60 Hz. A tensão de saída da subestação, na Barra 18, foi acrescida de 2% para compensar as quedas de tensão devido às impedâncias dos segmentos da rede. A modelagem foi delimitada numa faixa de variação aproximadamente igual a ± 5% da tensão fundamental sobre as cargas avaliadas. Neste estudo de caso, optou-se pela utilização da metodologia proposta no Capítulo 3.

Figura 7 – Diagrama unifilar da rede radial.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os estímulos necessários ao processo de estimação dos parâmetros do modelo ocorreram sobre a tensão da subestação, que é puramente senoidal. Tais variações assumiram valores aleatórios numa faixa igual a ± 5% em relação ao valor da tensão fundamental aplicada no alimentador. Apesar da tensão na subestação ser puramente senoidal, é possível verificar a ocorrência de distorções harmônicas nas tensões das demais barras da rede, devido à presença de cargas não lineares no sistema. Estas cargas injetam correntes harmônicas que produzem quedas de tensão harmônicas sobre as impedâncias dos segmentos de rede. Este efeito provoca a distorção harmônica da tensão aplicada sobre as cargas do alimentador.

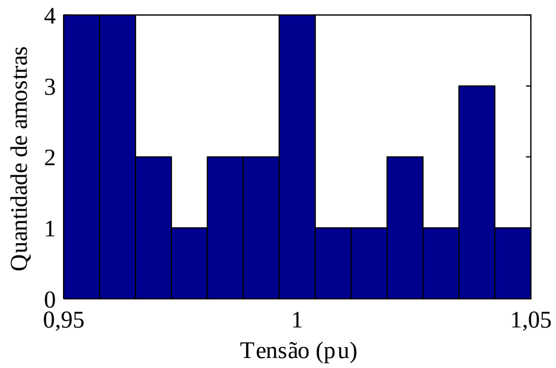
Conforme estabelecido em ANEEL (2017), para fins de realização de cálculos relacionados com as distorções harmônicas de tensão, devem ser consideradas as componentes até a 40ª ordem harmônica. Assim, para o estudo de caso deste capítulo, a maior ordem harmônica N considerada no modelo é igual a 40. Para determinar as componentes harmônicas de tensão e corrente na carga foi utilizada a FFT já disponível no *software* PSCAD.

A Barra 66 do alimentador, destacada em vermelho na Figura 7, foi escolhida para a realização da modelagem, onde foram capturadas as amostras de tensão e corrente para o processo de identificação. Assim, todos os elementos do sistema à jusante desta barra, circulados por uma linha tracejada na Figura 7, foram modelados como uma única carga composta. Este ponto da rede engloba as cargas conectadas às Barras 69, 70 e 75, bem como os seguimentos de rede entre as Barras 66 e 75, entre as Barras 66 e 70 e entre as Barras 70 e 69.

5.2 Quantidade de Amostras e Seleção de Dados

Seguindo a metodologia proposta na Seção 3.2.3 os dados para o processo de estimação foram selecionados. Inicialmente, em relação aos valores das magnitudes das tensões harmônicas da carga avaliada, detectou-se que as componentes de ordem par e múltiplas de três não são relevantes devido ao seu valor reduzido e, portanto, devem ser excluídas da modelagem. Em todos os casos a DTT_I% na carga, que é calculada somente com as componentes ímpares não múltiplas de 3, não provocou redução superior a 0,5% da DTT%. Consequentemente, é possível utilizar a Equação 29 para determinar a quantidade mínima de amostras necessárias ao processo de estimação dos parâmetros do modelo. Para o valor de N, definido anteriormente igual a 40, têm-se que M_{pos} é igual a 13,67. Portanto, a quantidade de medidas deve ser um número inteiro maior do que o valor de M_{pos} calculado. Considerando que pode haver a presença de ruídos nas medições, devido aos métodos de cálculo utilizados pelo simulador, adotou-se a quantidade de medidas M igual a 28 para a construção do sistema sobredeterminado do processo de estimação dos parâmetros do modelo. Nos testes realizados foram coletadas 40 amostras de tensão e corrente da carga. Aproximadamente 70% dos dados coletados, 28 amostras, foram utilizados no processo de estimação dos parâmetros e os demais dados, 12 amostras, foram utilizados no processo de validação do modelo. O valor da primeira amostra foi atribuído à tensão inicial V_0, já que todas as suas componentes harmônicas ímpares não múltiplas de 3 são diferentes de zero. O histograma apresentado no Gráfico 11, mostra que os dados proporcionam operação em diferentes condições, já que há pelo menos uma amostra em cada segmento da faixa de variação da tensão na carga. Neste histograma, a tensão base, igual a 11,548 kV, foi obtida pelo valor central entre a menor e a maior tensão da componente fundamental entre as amostras de estimação. A faixa de variação foi considerada igual a $\pm 5\%$ em relação à tensão base. Para a carga avaliada, os postos das matrizes de observação das Equações 59, 69 e 70 são iguais a 12, 13 e 13, respectivamente. Como estes valores correspondem à quantidade de colunas destas matrizes, é possível constatar que suas colunas são linearmente independentes. A $DTT\%$ máxima para a carga avaliada foi igual a 2,06%, ou seja, inferior a 10%.

Gráfico 11 – Histograma das amostras de tensão fundamental da carga avaliada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3 Estimação dos Parâmetros do Modelo

O processo de identificação dos parâmetros do modelo proposto foi aplicado de acordo com o equacionamento descrito na Seção 3.2. Assim, considerando os dados de estimação, foram obtidos os parâmetros p_Z, p_I, p_P, q_Z, q_I, q_P, P_{0h}, Q_{0h} e Y_h^v, para cada h e v assumindo os valores 1, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31, 35 e 37, sendo que para as demais ordens harmônicas os valores de P_{0h}, Q_{0h} e Y_h^v são nulos. Os parâmetros da componente fundamental são determinados como descrito na Seção 3.2.1. Primeiramente, os parâmetros P_{01}, p_Z e p_I são obtidos por regressão múltipla pela Equação 41 e p_P é calculado pela Equação 48. Os parâmetros Q_{01}, q_Z, q_I e q_P são determinados da mesma forma pelas Equações 42 e 49. Os valores obtidos estão descritos na Tabela 6.

Para a busca exaustiva, os limites dos coeficientes ZIP c_{min} e c_{max} foram definidos como 0 e 1, respectivamente, e o passo de iteração igual a 0,0001. Durante o processo iterativo os valores das potências iniciais P_{01} e Q_{01}, são calculados pela Equação 47. Os valores dos parâmetros encontrados por este método estão descritos na Tabela 6. Os erros percentuais das potências ativa $e_{P1}^{max} \big/ \left|S_{01}^{fit}\right|$ e reativa $e_{Q1}^{max} \big/ \left|S_{01}^{fit}\right|$ fornecidos pela busca exaustiva, em relação ao método de regressão, são iguais a $4{,}4{\times}10^{-4}$ % e $0{,}4{\times}10^{-4}$ %, respectivamente. Portanto, para a carga avaliada nenhum destes erros superou o erro máximo admissível e_{max}, cujo valor foi definido igual a 0,5%. Assim, foram adotados os parâmetros encontrados pelo método da busca exaustiva.

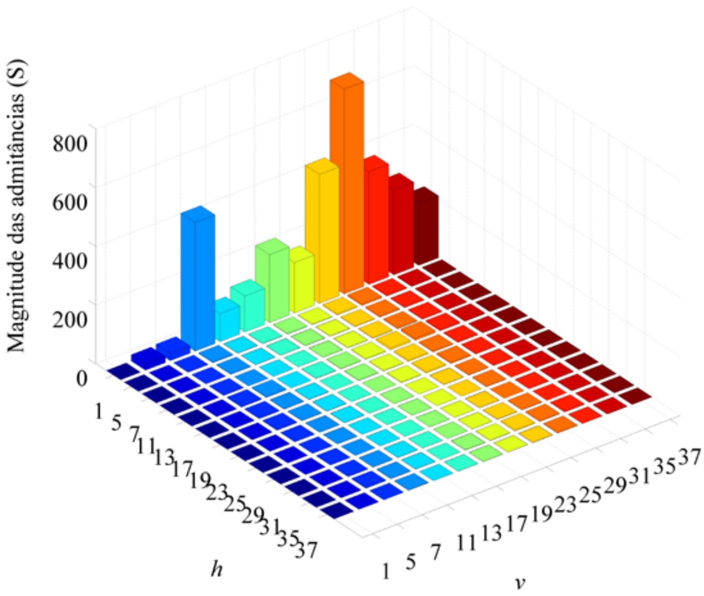
Tabela 6 – Coeficientes do modelo ZIP para a carga avaliada.

Método	**P_{01} (kW)**	**p_Z**	**p_I**	**p_P**	**Q_{01} (kVAr)**	**q_Z**	**q_I**	**q_P**
Regressão Múltipla	936,827	0,6691	0,3326	– 0,0017	160,844	0,7994	0,1458	0,0548
Busca exaustiva	936,825	**0,6709**	**0,3290**	**0,0001**	160,844	0,7991	0,1464	0,0545

Uma vez que os coeficientes ZIP e as potências iniciais foram determinados, é possível calcular os valores das admitâncias Y_1^v pela Equação 60.

A partir dos parâmetros já determinados para a componente fundamental, é possível determinar os parâmetros para as componentes de ordem superior como descrito na Seção 3.2.2. Os valores das potências iniciais P_{0h} e Q_{0h}, para h maior que 1, bem como as admitâncias Y_h^v, podem ser obtidos pelas Equações 71 e 72. As magnitudes das admitâncias são mostradas no Gráfico 12 e os valores de P_{0h} e Q_{0h} estão descritos na Tabela 7.

Gráfico 12 – Magnitudes das admitâncias para a carga avaliada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 7 – Potências iniciais estimadas para a carga avaliada.

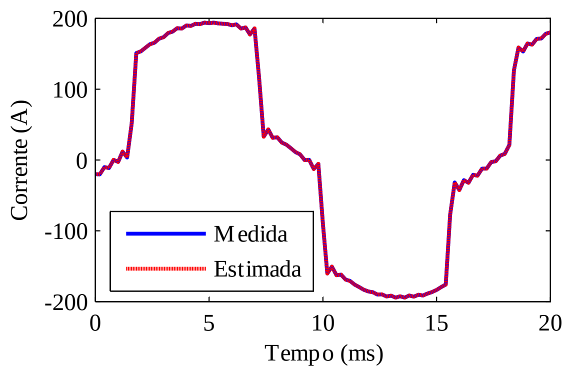
h	P_{0h} **(kW)**	Q_{0h} **(kVAr)**
5	0,046	– 1,946
7	– 0,286	– 0,380
11	– 0,106	– 0,323
13	– 0,572	– 1,260
17	– 0,380	– 0,078
19	– 0,150	– 0,928
23	0,350	– 0,288
25	0,207	0,012
29	0,126	0,055
31	0,135	– 0,332
35	– 0,522	– 0,159
37	0,155	0,098

5.4 Resultados

Considerando os parâmetros identificados para o conjunto de cargas modeladas, a resposta do modelo foi comparada com os dados de validação coletados na Barra 66 da rede radial. Assim, a forma de onda, de aproximadamente um período, da corrente cuja amostra apresentou o maior erro entre a corrente medida e estimada, em relação à corrente medida, é mostrada no Gráfico 13. Estas formas de onda foram reconstituídas a partir das componentes harmônicas até a 40ª ordem, como descrito pela Equação 73. As magnitudes e os ângulos medidos e estimados desta mesma amostra da corrente da carga estão apresentados no Gráfico 14. Os módulos dos erros entre os valores medidos e estimados das potências ativa e reativa, em relação à potência aparente medida, podem ser visualizados no Gráfico 15.

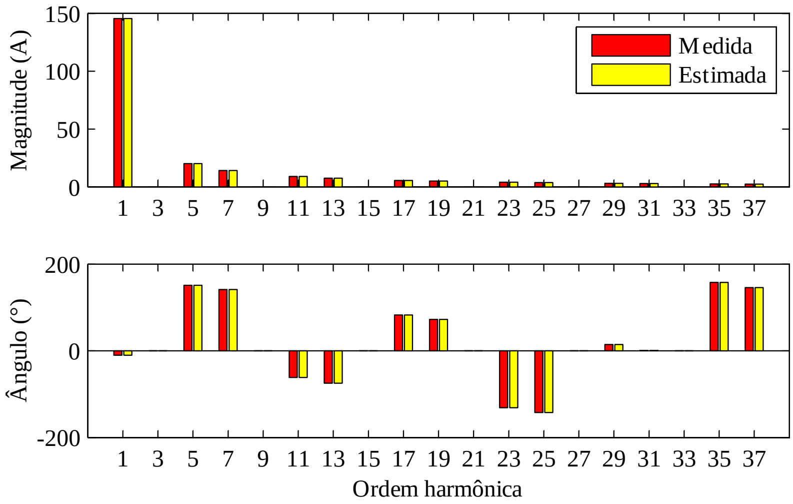
Através do Gráfico 13 e do Gráfico 14 é possível verificar que a corrente estimada é muito próxima da corrente medida, mesmo considerando o pior caso entre as amostras dos dados de validação. Além disso, é possível visualizar no Gráfico 15 que o módulo do erro relativo da corrente é muito baixo.

Gráfico 13 – Formas de onda da corrente da carga avaliada.



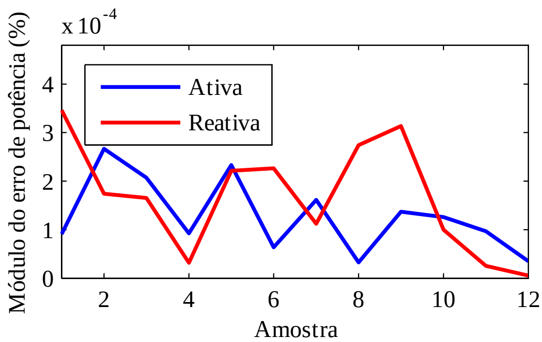
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 14 – Magnitudes e ângulos da corrente medida e estimada da carga avaliada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 15 – Módulos dos erros relativos entre os valores medidos e estimados das potências ativa e reativa da carga avaliada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para verificar se os valores estimados para os coeficientes ZIP da potência ativa são satisfatórios, propõe-se calcular a proporção de cargas com características de impedância, corrente e potência constante, em relação à potência ativa total na barra monitorada. No trecho da rede à jusante da Barra 66 existem cargas com característica de impedância constante e de corrente constante. A carga conectada à Barra 70 tem característica de corrente constante e as cargas conectadas às Barras 69 e 75 têm característica de impedância constante, bem como os segmentos de rede entre as Barras 66 e 75, entre as Barras 66 e 70 e entre as

Barras 70 e 69. Como no trecho avaliado não existem cargas com característica de potência constante, sua proporção é igual a zero. Considerando os dados de estimação, o valor médio da razão entre a soma das potências ativas fundamentais dos elementos com característica de impedância constante e a potência ativa total é igual a 0,6681. Para a proporção de corrente constante, o mesmo cálculo foi realizado considerando a componente fundamental da potência ativa na Barra 70 e a componente fundamental da potência ativa total na Barra 66, cujo valor é igual a 0,3319. Portanto, os valores aqui obtidos para os coeficientes ZIP são muito próximos daqueles calculados no processo de estimação dos parâmetros do modelo, onde p_Z , p_I e p_P são iguais a 0,6709, 0,3290 e 0,0001, respectivamente, os quais estão destacados em negrito na Tabela 6.

5.5 Conclusão

O modelo proposto, no Capítulo 3, foi aplicado em uma rede radial, visando a representação de um conjunto de cargas com diferentes características. Além destas cargas, a modelagem considerou os segmentos de redes conectados a elas. Os estímulos necessários ao processo de estimação dos parâmetros do modelo foram aplicados somente à tensão senoidal da subestação. Assim, as tensões harmônicas medidas na barra em que a modelagem foi realizada, foram produzidas pelas quedas de tensão nos trechos de rede, percorridos pelas correntes harmônicas das cargas modeladas e de outras cargas presentes no sistema. O modelo apresentou exatidão elevada, quando sua resposta foi comparada aos dados de validação. Além disso, ele foi capaz de informar a proporção da carga em termos de impedância constante, corrente constante e potência constante.

6 CONCLUSÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho, uma ampla revisão bibliográfica apresentou o estado da arte da modelagem de cargas, considerando várias abordagens e aplicações. Em todo o trabalho, maior destaque foi dado ao modelo estático polinomial e à modelagem harmônica. Entretanto, outros modelos estáticos e modelos dinâmicos também foram discutidos. Esta revisão forneceu os subsídios necessários para o desenvolvimento desta tese. Assim, diante das características dos modelos abordados pela literatura, novos modelos foram propostos e avaliados através de estudos de caso.

Uma proposta de modelo de carga que combina o tradicional modelo ZIP a uma matriz de admitância harmonicamente acoplada foi apresentada no Capítulo 3. Este novo modelo permite a representação de cargas não lineares submetidas a tensões variáveis com componentes harmônicas. O modelo é aplicável na caracterização de uma ou mais cargas harmônicas em sistemas com a presença de outras cargas não lineares, permitindo obter algum conhecimento físico sobre a carga representada. Foi descrito todo o procedimento para uso da metodologia, bem como o desenvolvimento matemático do modelo. Além disso, foram discutidos os cuidados na determinação da quantidade de amostras e na seleção de dados para o processo de estimação e validação dos parâmetros. Vários estudos de caso foram apresentados para mostrar a aplicação da metodologia proposta neste trabalho. Para as cargas modeladas nos estudos de caso, a limitação dos coeficientes ZIP não prejudicou significativamente a exatidão do modelo e permitiu determinar a proporção da potência fundamental em relação à impedância constante, corrente constante e potência constante. Um destes estudos apresentou o caso de uma rede radial. Neste estudo, um trecho do alimentador foi modelado, contendo diferentes cargas e segmentos de rede. Em todas as avaliações realiadas, a exatidão do modelo foi elevada, mesmo ele possuindo uma quantidade menor de parâmetros em relação ao modelo de Norton harmonicamente acoplado.

Outra nova proposta de modelo de carga foi apresentada no Capítulo 4. Este modelo é constituído por parcelas de impedância constante, potência constante e uma matriz de corrente constante harmonicamente acoplada. Trata-se de uma proposta, diferente de outras encontradas na literatura, que agrega uma variedade de termos tipicamente utilizados para a caracterização de cargas reais. Este novo modelo permite a modelagem de diferentes tipos de cargas não lineares submetidas a tensões variáveis com componentes harmônicas. O modelo é aplicável para a modelagem de uma ou mais cargas harmônicas em sistemas com a presença de outras cargas não lineares. Além do desenvolvimento matemático do modelo, foi descrito todo o procedimento para uso da metodologia de obtenção dos seus parâmetros. Esta metodologia considerou, também, os cuidados na determinação da quantidade de amostras e na seleção de dados para o processo de estimação e validação dos parâmetros. Quatro estudos de caso foram apresentados para mostrar a aplicação da metodologia proposta e a adequação do modelo em diferentes situações, sendo o mesmo aplicável em simuladores para representar cargas. Uma avaliação de possíveis simplificações do modelo pode ser vantajosa, visando a diminuição da sua quantidade de parâmetros, mediante a eliminação ou redução de algum dos seus termos. Desta forma, pode-se verificar a exclusão de uma parcela completa do modelo, como o termo de impedância constante, ou ainda, a redução da quantidade de elementos da matriz de correntes acopladas. Por exemplo, a matriz de correntes constantes pode ser modificada de modo a conter apenas termos em sua diagonal principal. Tal flexibilidade pode ajudar a simplificar sua implementação, dependendo do tipo de carga que está sendo modelada. Entretanto, esta mudança só deve ser aplicada se a resposta do modelo for compatível com o nível de exatidão desejado para o sistema onde a carga modelada está inserida.

O intuito deste trabalho não é promover uma comparação entre os novos modelos propostos, e sim fornecer alternativas de modelagem harmônica com características distintas, mas que apresentem boa exatidão para diferentes tipos de cargas submetidas a tensões harmônicas variáveis.

Os resultados dos estudos de caso mostraram que, em determinadas cargas, várias componentes harmônicas de tensão interferem no valor de uma dada componente de potência e, consequentemente, na corrente harmônica da carga. Além disso, as várias componentes harmônicas de potência da carga foram afetadas de modo diferente pelas variações de tensão, indicando a influência da carga no fluxo harmônico e, também, na injeção de harmônicos na rede. Isto confirma a aplicabilidade do modelo para estudos harmônicos em sistemas submetidos a tensões harmônicas variáveis.

Os novos modelos propostos nesta tese foram capazes de modelar, com exatidão elevada, várias cargas dispostas individualmente ou agregadas. Foi possível caracterizar o comportamento de diferentes tipos de carga, quando submetidas a tensões harmônicas variáveis. A metodologia proposta para ambos os modelos permitiu a caracterização da carga experimental, mesmo com a presença de ruídos de medição nos dados coletados por um medidor de qualidade de energia.

Atualmente, normas internacionais já recomendam limites para as distorções de corrente produzidas pelas unidades consumidoras, fato que ainda não é tratado pelos procedimentos nacionais vigentes, relativos à qualidade da energia elétrica. Entretanto, as normas nacionais têm aumentado o nível de exigência em relação aos índices de qualidade de energia, seguindo as tendências internacionais. Associado ao crescente uso de cargas não lineares, tais fatores normativos requerem estudos do comportamento harmônico em sistemas elétricos. O advento das *smart grids* e o aumento do número de unidades de medição de grandezas elétricas, relacionadas à qualidade de energia, podem tornar cada vez mais viáveis estas análises harmônicas.

Como recomendações de trabalhos futuros sugere-se a determinação de parâmetros em tempo real para os modelos propostos, visando uma representação mais acurada de cargas variáveis ao longo do tempo. O uso de técnicas de estimação de parâmetros variantes no tempo pode auxiliar a identificação de cargas harmônicas variáveis. Assim, poderiam ser considerados fatores como a mudança do ponto de operação do sistema, o envelhecimento de seus componentes e a ocorrência de falhas. Novos trabalhos podem considerar o uso de técnicas de filtragem de dados, associadas a outros métodos de identificação dos parâmetros. Adicionalmente, propõe-se a avaliação da modelagem de outros tipos de cargas, além daquelas apresentadas neste trabalho. Considerando a crescente inserção de fontes de geração distribuída no sistema elétrico, como a geração fotovoltaica e a eólica, estudos podem ser realizados considerando a aplicação dos modelos propostos em sistemas com a presença destas fontes de geração. Assim, seria possível avaliar o emprego das modelagens propostas na caracterização de fontes de geração distribuída, as quais tipicamente utilizam inversores de frequência, podendo injetar harmônicas na rede. Além disso, poderiam ser analisadas as aplicações dos modelos para representar trechos da rede contendo um conjunto de cargas harmônicas associadas a fontes de geração distribuída. Estes estudos podem auxiliar a identificação dos principais elementos poluidores do sistema, como cargas ou fontes que injetam harmônicos na rede.

REFERÊNCIAS

AGUIRRE, L. A. **Introdução à Identificação de Sistemas – Técnicas Lineares e Não-Lineares Aplicadas a Sistemas Reais**. 3. Belo Horizonte: UFMG, 2007. ISBN 9788570415844.

AL-KANDARI, A. M.; EL-NAGGAR, K. M. Recursive identification of harmonic loads in power systems. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems,** v. 28, n. 8, p. 531-536, 2006.

ALKANDARI, A. M.; ALDUAIJ, O. Using Z-Transform for Electric Loads Modeling in the Presence of Harmonics. **International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA),** v. 5, n. 5, p. 8-13, 2015.

ALMEIDA, C. F. M. **Fontes Distribuídas de Harmônicos em Sistemas Elétricos de Potência**. 2012. 267p. Tese (Doutor em Engenharia). Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

ALMEIDA, C. F. M.; KAGAN, N. A novel technique for modeling aggregate harmonic-producing loads. CIRED 21st International Conference on Electricity Distribution, Frankfurt, 2011. p.6-9.

______. Using Evolutionary Algorithms to Determine Frequency-Dependent Network Equivalents. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems,** v. 24, n. 6, p. 741-752, December 01 2013.

ALMEIDA, F. C. B. et al. Assessment of Load Modeling in Power System Security Analysis Based on Static Security Regions. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems,** v. 24, n. 1, p. 148-161, April 01 2013.

ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 1 - Introdução. Revisão 9. p. 61, 2015.

______. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 8 - Qualidade de Energia Elétrica. Revisão 9. p. 84, 2017.

AREE, P. Power flow computation considering nonlinear characteristics of composite load model. Electrical Engineering Congress (iEECON), 2014 International, 2014. 19-21 March 2014. p.1-4.

AREFIFAR, S. A.; XU, W. Online Tracking of Voltage-Dependent Load Parameters Using ULTC Created Disturbances. **IEEE Transactions on Power Systems,** v. 28, n. 1, p. 130-139, 2013.

ARGHANDEH, R. et al. Phasor-based assessment for harmonic sources in distribution networks. **Electric Power Systems Research,** v. 116, p. 94-105, 2014.

ARRILLAGA, J.; WATSON, N. R. **Power system harmonics**. John Wiley & Sons, 2004. ISBN 0470871210.

BAGHERI, R. et al. Determination of aggregated load power consumption, under non-sinusoidal supply using an improved load model. **Energy Conversion and Management,** v. 50, n. 6, p. 1563-1569, 2009.

BALCI, M. E. et al. Experimental verification of harmonic load models. Universities Power Engineering Conference, 2008. UPEC 2008. 43rd International, 2008. 1-4 Sept. 2008. p.1-4.

BOKHARI, A. et al. Experimental Determination of the ZIP Coefficients for Modern Residential, Commercial, and Industrial Loads. **IEEE Transactions on Power Delivery,** v. 29, n. 3, p. 1372-1381, 2014.

BRUNORO, M.; ENCARNAÇÃO, L. F.; FARDIN, J. F. Modelagem de Cargas para Estudos de Regime Permanente, de Transientes e de Componentes Harmônicas em Sistemas Elétricos de Potência. **6º Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**, 2016a. Disponível em: < http://www.swge.inf.br/PDF/SBSE2016-0139_027715.PDF >. Acesso em: 1 jul. 2016.

______. Modelagem Harmônica de Cargas Submetidas a Tensões Variáveis. **6º Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**, 2016b. Disponível em: < http://www.swge.inf.br/PDF/SBSE2016-0140_034520.PDF >. Acesso em: 1 jul. 2016.

______. Modelagem Harmônica para Diferentes Cargas Utilizadas no Sistema Elétrico. **6º Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**, 2016c. Disponível em: < http://www.swge.inf.br/PDF/SBSE2016-0205_027815.PDF >. Acesso em: 1 jul. 2016.

______. Modeling of loads dependent on harmonic voltages. **Electric Power Systems Research,** v. 152, p. 367-376, 10/08/2017 2017.

BYOUNG-KON, C. et al. Measurement-based dynamic load models: derivation, comparison, and validation. **Power Systems, IEEE Transactions on,** v. 21, n. 3, p. 1276-1283, 2006a.

BYOUNG-KON, C. et al. Development of composite load models of power systems using on-line measurement data. Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE, 2006b. p.8 pp.

CANESIN, C. A. et al. A time-domain harmonic power-flow analysis in electrical energy distribution networks, using Norton models for non-linear loading. Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2014 IEEE 16th International Conference on, 2014. 25-28 May 2014. p.778-782.

CHANG, G. W. Modeling highly nonlinear load dynamics for harmonic assessment. Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE, 2012. 22-26 July 2012. p.1-4.

CHANG, G. W.; CHENG, I. C. A neural network-based method of modeling electric arc furnace load for power engineering study. Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE, 2010. 25-29 July 2010. p.1-1.

CHEN, Q. et al. Parameter estimation and comparison of the load models with considering distribution network directly or indirectly. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems,** v. 32, n. 9, p. 965-968, 2010.

COLLIN, A. J. et al. Component-based aggregate load models for combined power flow and harmonic analysis. Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower 2010), 7th Mediterranean Conference and Exhibition on, 2010. 7-10 Nov. 2010. p.1-10.

DEESE, A.; NWANKPA, C. O. Novel approach to measurement-based load modeling via analog and Jacobi-based methods. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems,** v. 53, n. 1, p. 329-337, 2013.

DÖŞOĞLU, M.; ARSOY, A. B. Modeling and simulation of static loads for wind power applications. **Neural Computing and Applications,** v. 25, n. 5, p. 997-1006, 2014.

EPRI. **Measurement-Based Load Modeling**. Technical Report 1014402. Palo Alto, CA. 2006

FAURI, M. Harmonic modelling of non-linear load by means of crossed frequency admittance matrix. **IEEE Transactions on Power Systems,** v. 12, n. 4, p. 1632-1638, 1997.

FEINBERG, E.; HU, J.; YUAN, E. A stochastic search algorithm for voltage and reactive power control with switching costs and ZIP load model. **Electric Power Systems Research,** v. 133, p. 328-337, 2016.

FERREIRA, D. D. et al. Method based on independent component analysis for harmonic extraction from power system signals. **Electric Power Systems Research,** v. 119, p. 19-24, 2015.

FOLTING, A. S. et al. Practical implementation of the coupled norton approach for nonlinear harmonic models. Power Systems Computation Conference (PSCC), 2014, 2014. 18-22 Aug. 2014. p.1-7.

FUENTES, J. A. et al. Harmonic model of electronically controlled loads. Power Engineering Society Summer Meeting, 2000. IEEE, 2000. p.1805-1810 vol. 3.

GHORBANI, M. J. et al. Residential Loads Modeling by Norton Equivalent Model of Household Loads. Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2011 Asia-Pacific, 2011. 25-28 March 2011. p.1-4.

GUNDA, S. K.; KUMAR, T. R.; SARMA, D. V. S. S. S. Implementation of Kalman filtering algorithm for Harmonic Load Impedance modelling of Electrical loads with Experimental Verification. India Conference (INDICON), 2012 Annual IEEE, 2012. 7-9 Dec. 2012. p.847-852.

GUO, H. et al. Parameter estimation of dynamic load model using field measurement data performed by OLTC operation. Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE, 2012. 22-26 July 2012. p.1-7.

HAN, J.; PEI, J.; KAMBER, M. **Data Mining: Concepts and Techniques**. Elsevier Science, 2011. ISBN 9780123814807.

HERRERA-OROZCO, A.; MORA-FLÓREZ, J.; PÉREZ-LONDOÑO, S. An impedance relation index to predict the fault locator performance considering different load models. **Electric Power Systems Research,** v. 107, p. 199-205, 2014.

IEEE. Bibliography on load models for power flow and dynamic performance simulation. **Power Systems, IEEE Transactions on,** v. 10, n. 1, p. 523-538, 1995a.

______. Standard load models for power flow and dynamic performance simulation. **Power Systems, IEEE Transactions on,** v. 10, n. 3, p. 1302-1313, 1995b.

______. Task Force on Harmonic Modeling and Simulation. Modeling and simulation of the propagation of harmonics in electric power networks. I. Concepts, models, and simulation techniques. **IEEE Transactions on Power Delivery,** v. 11, n. 1, p. 452-465, 1996.

______. IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. **IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992)**, p. 1-29, 2014.

JAVADI, A. et al. Experimental Investigation on a Hybrid Series Active Power Compensator to Improve Power Quality of Typical Households. **IEEE Transactions on Industrial Electronics,** v. 63, n. 8, p. 4849-4859, 2016.

JIN, M. et al. Measurement-based Load Modeling using Genetic Algorithms. Evolutionary Computation, 2007. CEC 2007. IEEE Congress on, 2007. 25-28 Sept. 2007. p.2909-2916.

JU, P. et al. Load modeling for wide area power system. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems,** v. 33, n. 4, p. 909-917, 2011.

KAKRAN, S.; CHANANA, S. Smart operations of smart grids integrated with distributed generation: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews,** v. 81, n. Part 1, p. 524-535, 2018.

KARIMZADEH, F.; ESMAEILI, S.; HOSSEINIAN, S. H. A Novel Method for Noninvasive Estimation of Utility Harmonic Impedance Based on Complex Independent Component Analysis. **IEEE Transactions on Power Delivery,** v. 30, n. 4, p. 1843-1852, 2015.

KARLSSON, D.; HILL, D. J. Modelling and identification of nonlinear dynamic loads in power systems. **Power Systems, IEEE Transactions on,** v. 9, n. 1, p. 157-166, 1994.

KERSTING, W. H. **Distribution System Modeling and Analysis, Third Edition**. Taylor & Francis, 2012. ISBN 9781439856222.

KEYHANI, A.; LU, W.; HEYDT, G. T. Neural network based composite load models for power system stability analysis. IEEE International Conference on Computational Intelligence for Measurement Systems and Applications, CIMSA, 2005. Giardini, Naxos, Italy. Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society, July 20-22, 2005. p.32-37.

KEYHANI, A.; WENZHE, L.; HEYDT, G. T. Composite neural network load models for power system stability analysis. Power Systems Conference and Exposition, 2004. IEEE PES, 2004. 10-13 Oct. 2004. p.1159-1163 vol.2.

KIM, B.-H.; KIM, H. Measurement-based estimation of the composite load model parameters. **Journal of Electrical Engineering and Technology,** v. 7, n. 6, p. 845-851, 2012.

KNYAZKIN, V.; CANIZARES, C. A.; SODER, L. H. On the parameter estimation and modeling of aggregate power system loads. **Power Systems, IEEE Transactions on,** v. 19, n. 2, p. 1023-1031, 2004.

KOCH, A. S. et al. Evaluation and validation of Norton approaches for nonlinear harmonic models. PowerTech (POWERTECH), 2013 IEEE Grenoble, 2013. 16-20 June 2013. p.1-6.

KUMAR, A.; KUMAR, J. ATC with ZIP load model – A comprehensive evaluation with third generation FACTS in restructured electricity markets. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems,** v. 54, p. 546-558, 2014.

KUNDUR, P.; BALU, N. J.; LAUBY, M. G. **Power System Stability and Control**. McGraw-Hill Education, 1994. ISBN 9780070359581.

LAMICH, M. et al. Nonlinear Loads Model for Harmonics Flow Prediction, Using Multivariate Regression. **IEEE Transactions on Industrial Electronics,** v. 64, n. 6, p. 4820-4827, 2017.

LAMICH, M. et al. Modeling harmonics of networks supplying nonlinear loads. Industrial Electronics (ISIE), 2014 IEEE 23rd International Symposium on, 2014. 1-4 June 2014. p.2030-2034.

LEITE, J. B.; MANTOVANI, J. R. S. Development of a Smart Grid Simulation Environment, Part I: Project of the Electrical Devices Simulator. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems,** v. 26, n. 1, p. 80-95, February 01 2015.

LESIEUTRE, B. C.; SAUER, P. W.; PAI, M. A. Development and comparative study of induction machine based dynamic P, Q load models. **Power Systems, IEEE Transactions on,** v. 10, n. 1, p. 182-191, 1995.

LI, J. et al. Study on power systems transient stability considering traction power supply system measurement-based load model. Advanced Power System Automation and Protection (APAP), 2011 International Conference on, 2011. 16-20 Oct. 2011. p.1430-1434.

LIN, C.-J. et al. Dynamic load models in power systems using the measurement approach. **Power Systems, IEEE Transactions on,** v. 8, n. 1, p. 309-315, 1993.

MAITRA, A. et al. Load model parameter derivation using an automated algorithm and measured data. Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE, 2008. 20-24 July 2008. p.1-7.

MAITRA, A. et al. Using System Disturbance Measurement Data to Develop Improved Load Models. Power Systems Conference and Exposition, 2006. PSCE '06. 2006 IEEE PES, 2006. Oct. 29 2006-Nov. 1 2006. p.1978-1985.

MANBACHI, M. et al. Quasi real-time ZIP load modeling for Conservation Voltage Reduction of smart distribution networks using disaggregated AMI data. **Sustainable Cities and Society,** v. 19, p. 1-10, 2015.

MANSOOR, A. et al. An investigation of harmonics attenuation and diversity among distributed single-phase power electronic loads. **IEEE Transactions on Power Delivery,** v. 10, n. 1, p. 467-473, 1995.

MARTI, J. R.; AHMADI, H.; BASHUALDO, L. Linear Power-Flow Formulation Based on a Voltage-Dependent Load Model. **Power Delivery, IEEE Transactions on,** v. 28, n. 3, p. 1682-1690, 2013.

MCGRANAGHAN, M.; BEAULIEU, G. Update on IEC 61000-3-6: Harmonic Emission Limits for Customers Connected to MV, HV, and EHV. 2005/2006 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, 2006. 21-24 May 2006. p.1158-1161.

MELO, I. D. et al. Harmonic state estimation for distribution networks using phasor measurement units. **Electric Power Systems Research,** v. 147, p. 133-144, 2017.

METALLINOS, K. S.; PAPADOPOULOS, T. A.; CHARALAMBOUS, C. A. Derivation and evaluation of generic measurement-based dynamic load models. **Electric Power Systems Research,** v. 140, n. Supplement C, p. 193-200, 2016/11/01 2016.

MICHAEL, M. A. et al. The impact of load modeling on power flow studies for the cyprus power system. Power Engineering Conference (UPEC), 2014 49th International Universities, 2014. 2-5 Sept. 2014. p.1-6.

MILANOVIC, J. V. On unreliability of exponential load models. **Electric Power Systems Research,** v. 49, n. 1, p. 1-9, 1999.

MIRANIAN, A.; ROUZBEHI, K. Nonlinear Power System Load Identification Using Local Model Networks. **Power Systems, IEEE Transactions on,** v. 28, n. 3, p. 2872-2881, 2013.

MOTA, L. T. M.; MOTA, A. A. Load modeling at electric power distribution substations using dynamic load parameters estimation. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems,** v. 26, n. 10, p. 805-811, 2004.

MURTY, V. V. S. N.; KUMAR, A. Mesh distribution system analysis in presence of distributed generation with time varying load model. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems,** v. 62, p. 836-854, 2014.

NAJAFABADI, A. M.; ALOUANI, A. T. Real time estimation of sensitive parameters of composite power system load model. Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), 2012 IEEE PES, 2012. 7-10 May 2012. p.1-8.

NASSIF, A. **Modeling, Measurement and Mitigation of Power System Harmonics**. 2009. 201p. Thesis (Doctoral). Electrical and Computer Engineering, University of Alberta, Edmonton, Alberta.

NASSIF, A. B.; YONG, J.; XU, W. Measurement-based approach for constructing harmonic models of electronic home appliances. **Generation, Transmission & Distribution, IET,** v. 4, n. 3, p. 363-375, 2010.

NDIAY, M. S. et al. Modeling Of Non-linear Loads By Synchronized Current Sources And Zip Model. 9º Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência (COBEP 2007), 2007. p.563-567.

OONSIVILAI, A.; EL-HAWARY, M. E. Power system dynamic load modeling using adaptive-network-based fuzzy inference system. Electrical and Computer Engineering, 1999 IEEE Canadian Conference on, 1999. 9-12 May 1999. p.1217-1222 vol.3.

PAK, L. F. et al. Real-Time Digital Time-Varying Harmonic Modeling and Simulation Techniques. IEEE Task Force on Harmonics Modeling and Simulation. **IEEE Transactions on Power Delivery,** v. 22, n. 2, p. 1218-1227, 2007.

PALMER, E. W.; LEDWICH, G. F. Three phase harmonic modelling of power system loads. **Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings C,** v. 140, n. 3, p. 206-212, 1993.

QUN, X. et al. Modeling Analysis for High Power Load with Voltage Source Harmonics. Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2012 Asia-Pacific, 2012. 27-29 March 2012. p.1-4.

REGULSKI, P. et al. Estimation of Composite Load Model Parameters Using an Improved Particle Swarm Optimization Method. **Power Delivery, IEEE Transactions on,** v. 30, n. 2, p. 553-560, 2015.

REY, G. R.; MUNETA, L. M. **Power quality harmonics analysis and real measurements data**: InTech 2011.

RIBEIRO, P. F. **Time-varying waveform distortions in power systems**. John Wiley & Sons, 2009. ISBN 0470746742.

ROMERO, A. A. et al. A novel fuzzy number based method to model aggregate loads for harmonic load-flow calculation. Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2008 IEEE/PES, 2008. 13-15 Aug. 2008. p.1-8.

RUDION, K. et al. Non-linear load modeling - Requirements and preparation for measurement. Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES '09. IEEE, 2009. 26-30 July 2009. p.1-7.

RYLANDER, M.; GRADY, W. M. Problems in the use of Norton equivalent models for single-phase nonlinear loads. Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE, 2010. 25-29 July 2010. p.1-7.

SAMUI, A.; SAMANTARAY, S. R. An active islanding detection scheme for inverter-based DG with frequency dependent ZIP–Exponential static load model. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems,** v. 78, p. 41-50, 2016.

SASIDHARAN, N. et al. An approach for an efficient hybrid AC/DC solar powered Homegrid system based on the load characteristics of home appliances. **Energy and Buildings,** v. 108, p. 23-35, 2015.

SENRA, R.; BOAVENTURA, W. C.; MENDES, E. M. A. M. Assessment of the harmonic currents generated by single-phase nonlinear loads. **Electric Power Systems Research,** v. 147, p. 272-279, 2017.

SEPULCHRO, W. N.; ENCARNAÇÃO, L. F.; BRUNORO, M. Harmonic State and Power Flow Estimation in Distribution Systems Using Evolutionary Strategy. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems,** v. 25, n. 3, p. 358-367, June 01 2014.

______. Harmonic Distortion and Power Flow State Estimation for Distribution Systems Based on Evolutionary Strategies. **IEEE Latin America Transactions,** v. 13, n. 9, p. 3066-3071, 2015.

SIMING, G.; OVERBYE, T. J. Parameter estimation of a complex load model using phasor measurements. Power and Energy Conference at Illinois (PECI), 2012 IEEE, 2012. 24-25 Feb. 2012. p.1-6.

SUN, Y. et al. A Harmonically Coupled Admittance Matrix Model for AC/DC Converters. **IEEE Transactions on Power Systems,** v. 22, n. 4, p. 1574-1582, 2007.

TERZIJA, V. et al. Wide-Area Monitoring, Protection, and Control of Future Electric Power Networks. **Proceedings of the IEEE,** v. 99, n. 1, p. 80-93, 2011.

VULETIĆ, J.; TODOROVSKI, M. Optimal capacitor placement in distorted distribution networks with different load models using Penalty Free Genetic Algorithm. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems,** v. 78, p. 174-182, 2016.

XAVIER, L. S. et al. Adaptive current control strategy for harmonic compensation in single-phase solar inverters. **Electric Power Systems Research,** v. 142, p. 84-95, 2017.

YANG, J. et al. Identification and application of nonlinear dynamic load models. **Journal of Control Theory and Applications,** v. 11, n. 2, p. 173-179, 2013.

YUANYUAN, S. et al. A Harmonically Coupled Admittance Matrix Model for AC/DC Converters. **Power Systems, IEEE Transactions on,** v. 22, n. 4, p. 1574-1582, 2007.

ZHAO, Y.; LI, J.; XIA, D. Harmonic source identification and current separation in distribution systems. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems,** v. 26, n. 1, p. 1-7, 2004.

ZHENSHU, W.; LINCHUAN, L.; LI, N. Power Load Modeling Based on Wide-Area Measurements and Support Vector Machine. Power and Energy Engineering Conference, 2009. APPEEC 2009. Asia-Pacific, 2009. 27-31 March 2009. p.1-6.

APÊNDICE A – PRODUÇÃO CIENTÍFICA

A lista abaixo apresenta os artigos publicados a partir dos estudos realizados neste trabalho.

- Modelagem de Cargas para Estudos de Regime Permanente, de Transientes e de Componentes Harmônicas em Sistemas Elétricos de Potência. 6º Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Natal, 2016. DOI: 10.20906/CPS/SBSE2016-0139;

- Modelagem Harmônica de Cargas Submetidas a Tensões Variáveis. 6º Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Natal, 2016. DOI: 10.20906/CPS/SBSE2016-0140;

- Modelagem Harmônica para Diferentes Cargas Utilizadas no Sistema Elétrico. 6º Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Natal, 2016. DOI: 10.20906/CPS/SBSE2016-0205;

- *Modeling of loads dependent on harmonic voltages*. Revista *Electric Power Systems Research*, 2017. DOI: 10.1016/j.epsr.2017.07.030.

APÊNDICE B – TRANSFORMAÇÃO DE DADOS

A transformação de dados pode ser utilizada em um sistema de equações para permitir que os dados originais da sua matriz de observação fiquem em uma mesma escala ou unidade. Nesta matriz, cada coluna contém diversas medidas de uma determinada variável. Entretanto, estas variáveis podem conter valores com ordens de grandeza bem diferentes umas das outras. Isto pode comprometer o processo de inversão matricial, durante a estimação dos parâmetros do sistema pelo método da regressão. A transformação de dados é capaz de mapear os valores de uma variável para um novo conjunto de valores, através de um processo de normalização.

Diferentes métodos de normalização são encontrados na literatura, onde pode-se citar a normalização Min-Max e por escala decimal (HAN; PEI; KAMBER, 2011; ZHENSHU; LINCHUAN; LI, 2009).

B.1 Normalização

A normalização Min-Max efetua uma transformação linear nos dados originais, alterando seu intervalo para um novo valor mínimo e máximo. A normalização do valor x, pertencente ao conjunto de dados da variável X, é descrita pela Equação 88.

$$x' = \frac{x - \min(X)}{\max(X) - \min(X)}(n_{\max} - n_{\min}) + n_{\min} \tag{88}$$

onde $n_{\min}$ e $n_{\max}$ são os novos valores mínimo e máximo para mapeamento da variável X, respectivamente.

A normalização por escala decimal move o ponto decimal dos valores de uma variável, onde o número de pontos decimais movidos depende do maior valor absoluto assumido por esta variável. A Equação 89 descreve a normalização por escala decimal.

$$x' = \frac{x}{10^j} \tag{89}$$

onde j é o menor inteiro tal que $\max(|x'|) < 1$.

É importante observar que os parâmetros estimados após a transformação de dados não são iguais aos parâmetros das variáveis originais. Neste caso, é necessário realizar uma transformação dos novos parâmetros para encontrar os parâmetros originais, com base no método de normalização aplicado.

B.2 Transformação de dados em sistemas com termo independente

A resposta estimada para o sistema com termo independente é descrita pela Equação 90.

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{\Phi} \cdot \boldsymbol{\theta} = \begin{bmatrix} 1 & \mathbf{\Phi}_1 & \cdots & \mathbf{\Phi}_N \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \theta_0 \\ \theta_1 \\ \vdots \\ \theta_N \end{bmatrix} \tag{90}$$

onde $\mathbf{\Phi}$ é a matriz de observação; $\boldsymbol{\theta}$ é o vetor de parâmetros a serem estimados; e $\mathbf{\Phi}_k$ é o vetor de medidas da k-ésima variável, onde k é um valor inteiro igual a 1 até N, sendo N a quantidade de variáveis.

A partir da Equação 88 aplicou-se a normalização Min-Max na m-ésima medida da variável $\mathbf{\Phi}_k$, considerando os novos limites mínimo e máximo iguais a -1 e 1, respectivamente. Assim a o valor normalizado de ϕ_k^m é descrito pela Equação 91, onde m é um valor inteiro igual a 1 até M, sendo M a quantidade de medidas.

$$\varphi_k^m = \frac{\phi_k^m - b_k}{a_k} \tag{91}$$

onde

$$a_k = \frac{\max(\mathbf{\Phi}_k) - \min(\mathbf{\Phi}_k)}{2} \tag{92}$$

$$b_k = \frac{\max(\mathbf{\Phi}_k) + \min(\mathbf{\Phi}_k)}{2} \tag{93}$$

Utilizando a Equação 91, é possível escrever matricialmente a normalização da matriz $\mathbf{\Phi}$ pela Equação 94.

$$\boldsymbol{\varphi} = (\mathbf{\Phi} - \mathbf{B}) \cdot \mathbf{A} \tag{94}$$

onde

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1/a_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1/a_N \end{bmatrix} \tag{95}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & b_1 & \cdots & b_N \end{bmatrix} \tag{96}$$

onde **A** é uma matriz diagonal; e **B** é uma matriz com dimensão igual a $M \times (N + 1)$.

Com a matriz de observação normalizada da Equação 94 é possível reescrever a estimativa para o novo sistema de equações conforme descrito pela Equação 97.

$$\hat{\mathbf{y}} = \boldsymbol{\varphi} \cdot \boldsymbol{\beta} \tag{97}$$

onde o novo vetor de parâmetros é descrito pela Equação 98.

$$\boldsymbol{\beta} = \begin{bmatrix} \beta_0 & \beta_1 & \cdots & \beta_N \end{bmatrix}^T \tag{98}$$

Após a obtenção dos parâmetros $\boldsymbol{\beta}$, por regressão, é necessário realizar a transformação dos mesmos, visando determinar os parâmetros $\boldsymbol{\theta}$ do sistema original. Tal transformação é descrita a seguir.

Substituindo a Equação 94 na Equação 97 tem-se como resultado a Equação 99.

$$\hat{\mathbf{y}} = \boldsymbol{\varphi} \cdot \boldsymbol{\beta} = (\mathbf{\Phi} - \mathbf{B}) \cdot \mathbf{A} \cdot \boldsymbol{\beta} = \mathbf{\Phi} \cdot \mathbf{A} \cdot \boldsymbol{\beta} - \mathbf{B} \cdot \mathbf{A} \cdot \boldsymbol{\beta} \tag{99}$$

Desenvolvendo o termo $\mathbf{B} \cdot \mathbf{A} \cdot \boldsymbol{\beta}$ da Equação 99, a partir das Equações 95 e 96, obtém-se o resultado descrito pela Equação 100, que é um vetor de dimensão $M \times 1$.

$$\mathbf{B} \cdot \mathbf{A} \cdot \boldsymbol{\beta} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & b_1 & \cdots & b_N \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1/a_1 \\ \vdots \\ \beta_N/a_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \cdot c \tag{100}$$

onde

$$c = \frac{b_1}{a_1} \cdot \beta_1 + \frac{b_2}{a_2} \cdot \beta_2 + \cdots + \frac{b_N}{a_N} \cdot \beta_N \tag{101}$$

sendo c um valor escalar.

Considerando que todos os termos da primeira coluna da matriz $\mathbf{\Phi}$ são sempre iguais a 1 e que a matriz $\mathbf{A}$ é diagonal, com seu primeiro termo sempre igual a 1, é possível demonstrar a relação descrita pela Equação 102, cujo resultado é um vetor de dimensão $M \times 1$.

$$\mathbf{\Phi} \cdot \mathbf{A} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \tag{102}$$

Substituindo a relação descrita pela Equação 102 na Equação 100, é possível reescrever a Equação 99 como descrito pela Equação 103.

$$\hat{\mathbf{y}} = \boldsymbol{\varphi} \cdot \boldsymbol{\beta} = \mathbf{\Phi} \cdot \mathbf{A} \cdot \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_N \end{bmatrix} - \mathbf{\Phi} \cdot \mathbf{A} \cdot \begin{bmatrix} c \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \mathbf{\Phi} \cdot \mathbf{A} \cdot \begin{bmatrix} \beta_0 - c \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_N \end{bmatrix} \tag{103}$$

Portanto, comparando a Equação 103 com a Equação 90 obtêm-se os parâmetros originais do sistema como descrito pela Equação 104. Neste caso, pode-se observar que os parâmetros $\boldsymbol{\theta}$ são determinados a partir dos novos parâmetros $\boldsymbol{\beta}$ e dos valores utilizados na normalização dos dados, presentes nas matrizes **A** e **B**.

$$\boldsymbol{\theta} = \mathbf{A} \cdot \begin{bmatrix} \beta_0 - c \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_0 - c \\ \beta_1 / a_1 \\ \vdots \\ \beta_N / a_N \end{bmatrix} \tag{104}$$

B.3 Transformação de dados em sistemas sem termo independente

A resposta estimada para o sistema sem termo independente é descrita pela Equação 105.

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{\Phi} \cdot \mathbf{\theta} = \begin{bmatrix} \mathbf{\Phi}_1 & \mathbf{\Phi}_2 & \cdots & \mathbf{\Phi}_N \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \vdots \\ \theta_N \end{bmatrix} \tag{105}$$

No caso de sistemas sem termo independente, a normalização Min-Max não é indicada, já que após esta transformação o novo sistema de equações passa a ter um termo independente, quando reescrito com as variáveis originais. Tal modificação impossibilita a determinação dos parâmetros originais a partir dos novos parâmetros encontrados. Assim, optou-se pela utilização da normalização por escala decimal.

A partir da Equação 89, a normalização por escala decimal foi aplicada em cada coluna da matriz $\mathbf{\Phi}$. O expoente j_k foi determinado para cada variável $\mathbf{\Phi}_k$ desta matriz. Assim, definindo-se $a_k = 10^{j_k}$, pode-se descrever a matriz $\mathbf{\Phi}$ normalizada pela Equação 106.

$$\mathbf{\varphi} = \mathbf{\Phi} \cdot \mathbf{A} \tag{106}$$

onde

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1/a_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1/a_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1/a_N \end{bmatrix} \tag{107}$$

Com a matriz de observação normalizada da Equação 106 é possível reescrever a estimativa para o novo sistema de equações conforme descrito pela Equação 108.

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{\varphi} \cdot \mathbf{\beta} \tag{108}$$

Após a obtenção dos parâmetros $\mathbf{\beta}$, por regressão, é necessário realizar a transformação dos mesmos, visando determinar os parâmetros $\mathbf{\theta}$ do sistema original. Tal transformação é descrita a seguir.

A partir das Equações de 105 a 108 pode-se descrever a Equação 109.

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{\Phi} \cdot \mathbf{\theta} = \mathbf{\varphi} \cdot \mathbf{\beta} = \mathbf{\Phi} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{\beta} \tag{109}$$

Portanto, comparando a Equação 109 com a Equação 105 obtêm-se os parâmetros originais do sistema como descrito pela Equação 110. Neste caso, pode-se observar que os parâmetros

$\boldsymbol{\theta}$ são determinados a partir dos novos parâmetros $\boldsymbol{\beta}$ e dos valores utilizados na normalização dos dados, presentes na matriz **A**.

$$\boldsymbol{\theta} = \mathbf{A} \cdot \boldsymbol{\beta} = \begin{bmatrix} \beta_1 / a_1 \\ \beta_2 / a_2 \\ \vdots \\ \beta_N / a_N \end{bmatrix} \tag{110}$$

APÊNDICE C – DADOS DOS CIRCUITOS PARA ESTUDOS DE CASO

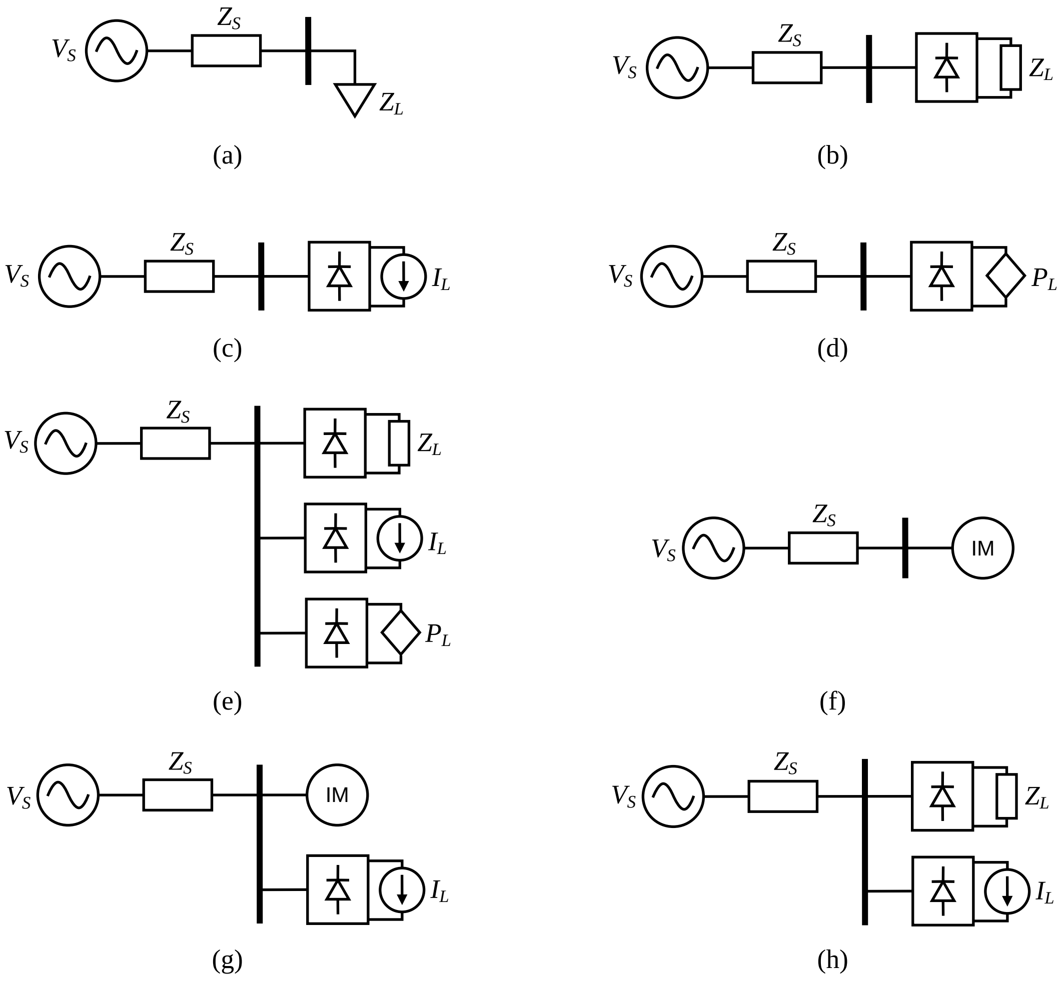
As Cargas de I a V e de VII a IX foram implementadas no *software* de simulação de transitórios eletromagnéticos PSCAD, cujos diagramas dos circuitos estão mostrados na Figura 8.

O diagrama do circuito utilizado na simulação da Carga I está mostrado na Figura 8a, onde a impedância Z_L é composta por uma carga resistiva trifásica de 0,25 kW em paralelo com carga indutiva trifásica de 0,25 kVAr em 60 Hz, ambas com tensão base de 100 V. A Carga II é composta por um retificador trifásico de onda completa a diodo com carga de impedância constante. O diagrama do circuito utilizado na simulação da Carga II está mostrado na Figura 8b, onde a impedância Z_L é composta por uma resistência de 23 Ω em série com uma indutância de 20 mH. A Carga III é composta por um retificador trifásico de onda completa a diodo com carga de corrente constante. O diagrama do circuito da Carga III está mostrado na Figura 8c, onde a corrente I_L é igual a 10 A. A Carga IV é composta por um retificador trifásico de onda completa a diodo com carga de potência constante. O diagrama do circuito da Carga IV está mostrado na Figura 8d, onde a potência P_L é igual a 1,8 kW. No simulador esta carga foi implementada com uma fonte de corrente controlada, cujo valor é dado pela razão entre a potência P_L e a tensão instantânea sobre a fonte de corrente. Porém, para evitar variações elevadas de corrente, a tensão utilizada neste cálculo passou por um filtro Butterworth de 3ª ordem com frequência de corte igual a 360 Hz. A Carga V é composta por três retificadores trifásicos de onda completa a diodo com cargas distintas. O diagrama do circuito da Carga V está mostrado na Figura 8e, onde a impedância Z_L é composta por uma resistência de 68 Ω em série com uma indutância de 20 mH; a corrente I_L é igual a 3,5 A; e a potência P_L é igual a 0,8 kW.

Para o motor de indução trifásico das Cargas VII e VIII foi utilizado, no PSCAD, o modelo de motor de indução de gaiola de esquilo na configuração típica com potência igual a 2 hp, tensão de fase nominal de 100 V, corrente nominal de 6 A. O torque da carga é igual a 0,5 pu. O diagrama da Carga VII está mostrado na Figura 8f. Na Carga VIII, cujo diagrama é mostrado na Figura 8g, o motor de indução trifásico é conectado em paralelo com o retificador trifásico de onda completa a diodo, onde a corrente I_L é igual a 3,5 A. Na Carga IX os retificadores trifásicos de onda completa a diodo com carga de impedância constante e de corrente constante são conectados em paralelo. O diagrama da Carga IX está mostrado na Figura 8h, onde a impedância Z_L é composta por uma resistência de 25 Ω em série com uma indutância de 10 mH; e a corrente I_L é igual a 3,5 A.

Para as Cargas de I a V e de VII a IX, mostradas na Figura 8, a impedância equivalente Z_S é composta por uma resistência de 1,0 mΩ em série com uma indutância de 0,5 mH. Para estas cargas a magnitude da tensão V_S assumiu valores aleatórios, necessários ao processo de identificação dos parâmetros do modelo. A faixa de variação da magnitude e o ângulo de cada componente harmônica desta tensão estão apresentados na Tabela 8. As magnitudes e ângulos das demais componentes harmônicas da tensão V_S são iguais a zero.

Figura 8 – Diagramas dos circuitos utilizados nas simulações de diferentes cargas:
(a) Carga I; (b) Carga II; (c) Carga III; (d) Carga IV; (e) Carga V; (f) Carga VII; (g) Carga VIII; (h) Carga IX.



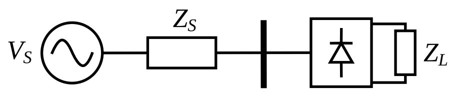
Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 8 – Magnitudes e ângulos das componentes harmônicas da fonte V_S para as Cargas de I a V.

h	**Magnitude de V_S (V)**	**Ângulo de V_S (°)**
1	100,000 ± 3,000	60
5	2,500 ± 0,125	60
7	1,800 ± 0,072	– 20
11	1,400 ± 0,098	10
13	0,800 ± 0,064	45
17	0,400 ± 0,036	– 15
19	0,300 ± 0,030	45
23	0,200 ± 0,022	– 30
25	0,100 ± 0,012	45

A Carga VI foi implementada experimentalmente e seu diagrama está mostrado na Figura 9. Esta carga é constituída por um retificador trifásico de onda completa a diodo com carga de impedância constante Z_L. Esta impedância é composta por uma resistência em série com uma indutância, cujos valores nominais são iguais a 45 Ω e 1 mH, respectivamente.

Figura 9 – Diagrama do circuito experimental da Carga VI.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para avaliar a Carga VI, a fonte trifásica V_S, utilizada no circuito equivalente, foi a *Pacific Power Source* modelo 360AMX. Neste caso, esta fonte assumiu valores aleatórios, necessários ao processo de identificação dos parâmetros do modelo. A faixa de variação da magnitude e o ângulo de cada componente harmônica desta tensão estão apresentados na Tabela 9, onde as magnitudes e ângulos das demais componentes harmônicas de tensão da fonte são iguais a zero. Na Figura 9, a impedância equivalente Z_S é composta por uma indutância, cujo valor nominal é igual a 0,5 mH.

Tabela 9 – Magnitude e ângulo das componentes harmônicas de V_S para a Carga VI.

h	**Magnitude de V_S (V)**	**Ângulo de V_S (°)**
1	100,0 ± 3,0	0
5	2,5 ± 0,3	180
7	1,8 ± 0,3	0
11	1,4 ± 0,2	180
13	0,8 ± 0,2	180
17	0,5 ± 0,3	0
19	0,4 ± 0,2	0
23	0,3 ± 0,2	180
25	0,2 ± 0,2	180

APÊNDICE D – EXEMPLOS DE UTILIZAÇÃO DAS METODOLOGIAS PROPOSTAS

Foram utilizados os dados da Carga I, descrita no APÊNDICE C, para exemplificar o passo a passo de utilização das metodologias propostas nos Capítulos 3 e 4. Neste caso, a quantidade de harmônicas e de amostras foi reduzida a fim de simplificar a demonstração.

Foram consideradas as harmônicas até a 10ª ordem, ou seja, N = 10. Os valores medidos de 6 amostras da tensão e corrente na Carga I estão descritos na Tabela 10. Nesta tabela, é possível observar que as magnitudes da tensão na carga são nulas para as ordens harmônicas pares e múltiplas de 3. Consequentemente, são consideradas apenas as componentes de ordem 1, 5 e 7, uma vez que a DTT_I% não provocou redução superior a 0,5% da DTT%. A Tabela 11 contém os valores das potências ativa e reativa da carga, obtidas a partir da Equação 27.

D.1 Passo a passo da metodologia proposta no Capítulo 3

Considerando apenas as componentes harmônicas de ordem ímpar não múltiplas de 3, a partir da Equação 29, com N igual a 10, é possível determinar M_{pos} igual a 3,67. Assim, a quantidade mínima de amostras é igual a 4. Neste caso, foi utilizado M igual a 4, visando a simplificação deste exemplo. As amostras de 1 a 4 da Tabela 10 e da Tabela 11 foram selecionadas para determinar os parâmetros do modelo, já que as mesmas satisfazem o critério de diversidade.

A determinação dos parâmetros da componente fundamental do modelo está descrita na Seção 3.2.1. A primeira amostra de tensão é considerada igual ao valor inicial da tensão da carga, cujos valores estão destacados em negrito na Tabela 10, onde $|V_{01}|$ = 99,527 V; $|V_{05}|$ = 2,592 V; e $|V_{07}|$ = 1,833 V. Portanto, através da Equação 23, é possível determinar, para cada uma das 4 amostras, os valores de $\overline{V}_h$, onde $\overline{V}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1{,}0261 & 0{,}99652 & 0{,}97713 \end{bmatrix}^T$; $\overline{V}_5 = \begin{bmatrix} 1 & 0{,}9117 & 0{,}9116 & 0{,}9671 \end{bmatrix}^T$; e $\overline{V}_7 = \begin{bmatrix} 1 & 0{,}9764 & 0{,}9378 & 0{,}9521 \end{bmatrix}^T$.

Por regressão múltipla, os parâmetros da componente fundamental $\hat{\boldsymbol{\theta}}_{P1}$ e $\hat{\boldsymbol{\theta}}_{Q1}$ são determinados pelas Equações 41 e 42, respectivamente, onde os valores de $\mathbf{P}_{L1}$ e $\mathbf{Q}_{L1}$ estão descritos na Tabela 11, considerando as amostras de 1 a 4; e

$$\boldsymbol{\varphi}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0{,}052861 & 0{,}026090 & 1 \\ -0{,}0069384 & -0{,}0034753 & 1 \\ -0{,}045226 & -0{,}022875 & 1 \end{bmatrix}$$

sendo cada linha desta matriz de observação determinada pela Equação 34. Assim, $\hat{\boldsymbol{\theta}}_{P1} = \begin{bmatrix} 247{,}72 & -0{,}15846 & 247{,}64 \end{bmatrix}^T$ e $\hat{\boldsymbol{\theta}}_{Q1} = \begin{bmatrix} 247{,}58 & 0{,}12195 & 247{,}64 \end{bmatrix}^T$.

Tabela 10 – Valores medidos de tensão e corrente da Carga I.

Amostra			***h* = 1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Tensão da carga – *V*	Magnitude (V)	1	**99,527**	0,000	0,000	0,000	**2,592**	0,000	**1,833**	0,000	0,000	0,000
		2	102,124	0,000	0,000	0,000	2,363	0,000	1,790	0,000	0,000	0,000
		3	99,182	0,000	0,000	0,000	2,363	0,000	1,719	0,000	0,000	0,000
		4	97,251	0,000	0,000	0,000	2,507	0,000	1,745	0,000	0,000	0,000
		5	99,793	0,000	0,000	0,000	2,469	0,000	1,783	0,000	0,000	0,000
		6	101,436	0,000	0,000	0,000	2,596	0,000	1,763	0,000	0,000	0,000
	Ângulo (°)	1	59,733	–109,379	89,988	–3,816	58,657	–145,115	–21,880	–96,929	71,251	–60,206
		2	59,733	–117,879	96,067	16,299	58,657	–165,390	–21,880	–121,436	87,089	–78,744
		3	59,733	–118,577	95,101	15,751	58,657	–165,386	–21,880	–120,690	88,616	–79,239
		4	59,733	–119,150	96,282	15,265	58,657	–164,992	–21,880	–120,523	87,794	–78,432
		5	59,733	–108,349	88,810	–5,215	58,657	–148,398	–21,880	–100,233	71,405	–58,886
		6	59,733	–109,317	88,022	–3,697	58,657	–146,817	–21,880	–97,818	72,432	–60,277
Corrente da carga – *I*	Magnitude (A)	1	3,5188	0,0000	0,0000	0,0000	0,0661	0,0000	0,0463	0,0000	0,0000	0,0000
		2	3,6106	0,0000	0,0000	0,0000	0,0603	0,0000	0,0452	0,0000	0,0000	0,0000
		3	3,5066	0,0000	0,0000	0,0000	0,0603	0,0000	0,0434	0,0000	0,0000	0,0000
		4	3,4383	0,0000	0,0000	0,0000	0,0639	0,0000	0,0441	0,0000	0,0000	0,0000
		5	3,5282	0,0000	0,0000	0,0000	0,0630	0,0000	0,0450	0,0000	0,0000	0,0000
		6	3,5863	0,0000	0,0000	0,0000	0,0662	0,0000	0,0445	0,0000	0,0000	0,0000
	Ângulo (°)	1	14,733	10,767	16,226	21,614	47,346	32,617	–30,008	43,789	49,607	55,124
		2	14,733	22,015	33,110	44,127	47,347	66,434	–30,008	88,879	100,177	111,507
		3	14,733	22,020	33,111	44,126	47,347	66,437	–30,008	88,888	100,176	111,506
		4	14,733	22,026	33,121	44,120	47,347	66,446	–30,009	88,903	100,182	111,501
		5	14,733	10,757	16,224	21,619	47,346	32,626	–30,008	43,776	49,605	55,123
		6	14,733	10,759	16,223	21,621	47,346	32,623	–30,008	43,781	49,600	55,137

Tabela 11 – Valores das potências ativa e reativa da Carga I.

Amostra	h = 1		h = 5		h = 7	
	$\mathbf{P}_{L1}$(W)	$\mathbf{Q}_{L1}$(VAr)	$\mathbf{P}_{L5}$(W)	$\mathbf{Q}_{L5}$(VAr)	$\mathbf{P}_{L7}$(W)	$\mathbf{Q}_{L7}$(VAr)
1	247,64	247,64	0,168	0,0336	0,0840	0,0120
2	260,73	260,73	0,140	0,0279	0,0801	0,0114
3	245,93	245,93	0,140	0,0279	0,0739	0,0106
4	236,44	236,44	0,157	0,0314	0,0761	0,0109
5	248,97	248,97	0,152	0,0305	0,0794	0,0113
6	257,23	257,23	0,168	0,0337	0,0777	0,0111

A partir das Equações 35 e 36 é possível determinar as estimativas das potências iniciais P_{01} = 247,64 W e Q_{01} = 247,64 VAr e os coeficientes p_Z = 1,0003, p_I = – 6,3988×10^{-4}, q_Z = 0,99976 e q_I = 4,9245×10^{-4}. Os coeficientes da parcela de potência constante são determinados pelas Equações 48 e 49, onde p_P = 3,1378×10^{-4}; e q_P = – 2,5436×10^{-4}.

Por busca exaustiva, os parâmetros da componente fundamental são determinados. Neste caso, o tamanho definido para o passo de incremento dos coeficientes ZIP é igual a 0,001 e os limites para estes coeficientes são c_{min} = 0 e c_{max} = 1.

Na primeira iteração (i = 1) os valores dos coeficientes k_Z^1 e k_I^1 são inicializados com zero. Assim, é possível determinar $k_P^1 = 1$ pela Equação 48, cujo valor está entre os limites especificados. Assim, $\boldsymbol{\beta}_1^1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^T$, sendo cada linha deste vetor determinada pela Equação 45. A partir da Equação 47 é possível determinar $S_{01}^1 = 247{,}69 + j247{,}69\ \text{VA}$, onde a parte real e a parte imaginária de $\mathbf{S}_{L1}$ estão descritas na Tabela 11, considerando apenas as amostras de 1 a 4. O erro entre as potências ativa e reativa da carga, para cada medida, pode ser obtido pela Equação 46. Logo, para as 4 amostras os valores da parte real e imaginária da potência aparente da carga são $\mathbf{E}_{P1}^1 = \begin{bmatrix} -0{,}043180 & 13{,}048 & -1{,}7614 & -11{,}243 \end{bmatrix}^T$, em watts, e $\mathbf{E}_{Q1}^1 = \begin{bmatrix} -0{,}043063 & 13{,}048 & -1{,}7614 & -11{,}243 \end{bmatrix}^T$, em VAr, respectivamente. Portanto, as somas dos erros quadráticos das potências ativa e reativa da carga, na primeira iteração, são iguais a 299,75 W^2 e 299,75 VAr^2, respectivamente.

Na segunda iteração (i = 2) $k_Z^2 = 0$ e $k_I^2 = 0{,}001$, cujo valor foi incrementado de um passo. Portanto, $k_P^2 = 0{,}999$, contendo um valor que está entre os limites especificados. Assim, $S_{01}^2 = 247{,}69 + j247{,}69\ \text{VA}$. Ao final desta iteração, as somas dos erros quadráticos das potências ativa e reativa da carga são iguais a 299,45 W^2 e 299,45 VAr^2, respectivamente. Já que estes erros quadráticos são menores que os valores encontrados na iteração anterior, o conjunto de parâmetros desta iteração é armazenado como sendo a melhor solução até o momento.

Após k_I atingir o limite máximo, k_Z é incrementado de um passo e k_I recebe novamente o valor zero. Desta forma, todos os conjuntos possíveis de valores para os coeficientes ZIP são avaliados, considerando o passo de iteração e os limites definidos.

Ao final do processo iterativo da busca exaustiva, é possível determinar o conjunto de parâmetros que fornece as menores somas de erros quadráticos para as potências ativa e reativa. Desta forma, P_{01} = 247,64 W e Q_{01} = 247,64 VAr e os coeficientes p_Z = 1,000, p_I = 0,000, p_P = 0,000, q_Z = 1,000, q_I = 0,000, e q_P = 0,000 forneceram os menores erros quadráticos para as medidas consideradas. Para este conjunto de parâmetros as somas dos erros quadráticos das potências ativa e reativa da carga são iguais a $1{,}9539\times10^{-8}\ W^2$ e $2{,}1067\times10^{-8}\ VAr^2$, respectivamente.

Os erros máximos entre as potências estimadas pela regressão múltipla e pela busca exaustiva são iguais a $1{,}0675\times10^{-4}$ W e $1{,}0786\times10^{-4}$ VAr. Como $\left|S_{01}^{fit}\right| = 350{,}22\ \text{VA}$, então $e_{P1}^{max} \big/ \left|S_{01}^{fit}\right| = 3{,}0480\times10^{-5}\%$ e $e_{Q1}^{max} \big/ \left|S_{01}^{fit}\right| = 3{,}0799\times10^{-5}\%$. Para o erro máximo admissível e_{max} = 0,5%, verifica-se que o conjunto de parâmetros estimados pela busca exaustiva podem ser utilizados na modelagem da Carga I, já que a limitação dos coeficientes ZIP não provocou erros significativos.

Por regressão múltipla, as admitâncias da componente fundamental podem ser determinadas pela Equação 60, onde

$$\mathbf{\Delta S}_1 = \begin{bmatrix} -6{,}657\times10^{-5} + j5{,}043\times10^{-5} \\ 1{,}090\times10^{-4} + j7{,}983\times10^{-5} \\ 5{,}925\times10^{-6} - j3{,}488\times10^{-5} \\ -5{,}658\times10^{-5} - j1{,}046\times10^{-4} \end{bmatrix}, \qquad \mathbf{\Phi}_1 = \begin{bmatrix} 6{,}721 & 3{,}360 \\ 5{,}586 & 3{,}203 \\ 5{,}585 & 2{,}955 \\ 6{,}285 & 3{,}046 \end{bmatrix}$$

Efetuando-se a transformação de dados, como descrito na Seção B.3 do APÊNDICE B, considerando a matriz $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1/10 & 0 \\ 0 & 1/10 \end{bmatrix}$, então a matriz normalizada

$$\mathbf{\Phi}_1 \cdot \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0{,}6721 & 0{,}3360 \\ 0{,}5586 & 0{,}3203 \\ 0{,}5585 & 0{,}2955 \\ 0{,}6285 & 0{,}3046 \end{bmatrix}$$

Utilizando esta matriz normalizada na Equação 60 obtém-se a matriz de parâmetros igual a $\hat{\boldsymbol{\beta}}_1 = \begin{bmatrix} -1{,}775 - j1{,}257 & 3{,}407 + j2{,}420 \end{bmatrix}^T \cdot 10^{-3}$. Entretanto esta matriz deve passar por uma transformação para fornecer os parâmetros do sistema original. Neste caso, as admitâncias complexas são iguais a $\hat{\boldsymbol{\theta}}_1 = \mathbf{A} \cdot \hat{\boldsymbol{\beta}}_1 = \begin{bmatrix} Y_1^5 & Y_1^7 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} -1{,}775 - j1{,}257 & 3{,}407 + j2{,}420 \end{bmatrix}^T \cdot 10^{-4}$, em siemens.

De acordo com a Seção 3.2.2, os parâmetros das componentes de ordem superior à fundamental são obtidos pelas Equações 71 e 72. Assim, para *h* igual a 5, é possível obter a matriz de observação

$$\boldsymbol{\varphi}_{P5} = \begin{bmatrix} 1 & 9905{,}7 & 3{,}360 \\ 0{,}8311 & 10429{,}3 & 3{,}203 \\ 0{,}8311 & 9837{,}0 & 2{,}955 \\ 0{,}9352 & 9457{,}7 & 3{,}046 \end{bmatrix}$$

Já que os coeficientes ZIP da parte real da potência são iguais aos coeficientes da parte imaginária, então $\boldsymbol{\varphi}_{Q5} = \boldsymbol{\varphi}_{P5}$. Neste caso, a matriz para normalização

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1/1 & 0 & 0 \\ 0 & 1/10^5 & 0 \\ 0 & 0 & 1/10 \end{bmatrix}$$

Portanto, para *h* igual a 5, obtêm-se os vetores de parâmetros

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_{P5} = \begin{bmatrix} P_{05} & G_5^1 & G_5^7 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 0{,}1680 & 6{,}062 \times 10^{-10} & 1{,}081 \times 10^{-6} \end{bmatrix}^T$$

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_{Q5} = \begin{bmatrix} Q_{05} & B_5^1 & B_5^7 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 0{,}1680 & 6{,}062 \times 10^{-10} & 1{,}081 \times 10^{-6} \end{bmatrix}^T$$

Para *h* igual a 7,

$$\boldsymbol{\varphi}_{P7} = \boldsymbol{\varphi}_{Q7} = \begin{bmatrix} 1 & 9905,7 & 6,721 \\ 0,9533 & 10429,3 & 5,586 \\ 0,8796 & 9837,0 & 5,585 \\ 0,9066 & 9457,7 & 6,285 \end{bmatrix}$$

Neste caso, a matriz para normalização **A** é igual à matriz utilizada para h igual a 5. Portanto, para h igual a 7 obtém-se os parâmetros

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_{P7} = \begin{bmatrix} P_{07} & G_7^1 & G_7^5 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 0,08402 & -1,933\times10^{-9} & -5,964\times10^{-7} \end{bmatrix}^T$$

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_{Q7} = \begin{bmatrix} Q_{07} & B_7^1 & B_7^5 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 0,01199 & -2,287\times10^{-10} & 6,230\times10^{-7} \end{bmatrix}^T$$

D.2 Passo a passo da metodologia proposta no Capítulo 4

Considerando apenas as componentes harmônicas de ordem ímpar não múltiplas de 3, a partir da Equação 77, com N igual a 10, é possível determinar M_{pos} igual a 5,67. Assim, a quantidade mínima de amostras é igual a 6. Neste caso, foi utilizado M igual a 6, visando a simplificação deste exemplo. As amostras da Tabela 10 e da Tabela 11 foram utilizadas para determinar os parâmetros do modelo, já que as mesmas satisfazem o critério de diversidade.

A determinação dos parâmetros da componente fundamental do modelo está descrita na Seção 4.2.1. Assim,

$$\mathbf{y}_1 = \begin{bmatrix} 247,64 + j247,64 \\ 260,73 + j260,73 \\ 245,93 + j245,93 \\ 236,44 + j236,44 \\ 248,97 + j248,97 \\ 257,23 + j257,23 \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\varphi}_1 = \begin{bmatrix} 9905,7 & 99,527 & 2,592 & 1,833 & 1 \\ 10429,3 & 102,124 & 2,363 & 1,790 & 1 \\ 9837,0 & 99,182 & 2,363 & 1,719 & 1 \\ 9457,7 & 97,251 & 2,507 & 1,745 & 1 \\ 9958,6 & 99,793 & 2,469 & 1,783 & 1 \\ 10289,2 & 101,436 & 2,596 & 1,763 & 1 \end{bmatrix}$$

Uma transformação é realizada em $\boldsymbol{\varphi}_1$, como descrito na Seção B.2 do APÊNDICE B. Assim,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1/485,8 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2,437 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/0,116 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/0,057 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 9943,5 & 99,687 & 2,480 & 1,776 & 0 \end{bmatrix}$$

A matriz de observação transformada é igual a

$$(\boldsymbol{\varphi}_1 - \mathbf{B})\cdot\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -0{,}0778 & -0{,}0657 & 0{,}9701 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -0{,}9995 & 0{,}2402 & 1 \\ -0{,}2193 & -0{,}2076 & -1 & -1 & 1 \\ -1 & -1 & 0{,}2359 & -0{,}5399 & 1 \\ 0{,}0310 & 0{,}0432 & -0{,}0897 & 0{,}1145 & 1 \\ 0{,}7116 & 0{,}7175 & 1 & -0{,}2329 & 1 \end{bmatrix}$$

O vetor de parâmetros é calculado pela Equação 80

$$\boldsymbol{\beta} = \begin{bmatrix} 12{,}15 + j12{,}14 \\ -0{,}004050 + j0{,}002991 \\ -4{,}177\times10^{-5} + j2{,}988\times10^{-5} \\ 1{,}501\times10^{-6} + j5{,}093\times10^{-6} \\ 248{,}6 + j248{,}6 \end{bmatrix}$$

A partir das matrizes **A**, **B** e **β** é possível determinar c = 248,5 + j248,7.

Aplicando a transformação no vetor de parâmetros obtém-se

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_1 = \begin{bmatrix} 0{,}02501 + j0{,}02499 \\ -0{,}001662 + j0{,}001228 \\ -0{,}0003592 + j0{,}0002570 \\ 2{,}635\times10^{-5} + j8{,}941\times10^{-5} \\ 0{,}08256 - j0{,}06421 \end{bmatrix}$$

Portanto, $Z = 1/(0{,}02501 + j0{,}02499)^* = 20{,}00 + j19{,}99\ \Omega$; $S_1 = 0{,}08256 - j0{,}06421$ VA; e $\mathbf{I}_1 = \begin{bmatrix} -1{,}662 + j1{,}228 & -0{,}3592 + j0{,}2570 & 0{,}02635 + j0{,}08941 \end{bmatrix}$, em miliamperes.

O conjunto de parâmetros das componentes de ordem superior à fundamental é determinado pela Equação 86, onde

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_5 & \mathbf{y}_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0{,}1551 - j0{,}03103 & 0{,}08063 - j0{,}01153 \\ 0{,}1289 - j0{,}02580 & 0{,}07687 - j0{,}01099 \\ 0{,}1289 - j0{,}02579 & 0{,}07092 - j0{,}01014 \\ 0{,}1450 - j0{,}02903 & 0{,}07310 - j0{,}01045 \\ 0{,}1407 - j0{,}02815 & 0{,}07626 - j0{,}01090 \\ 0{,}1555 - j0{,}03112 & 0{,}07457 - j0{,}01066 \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\varphi} = \begin{bmatrix} 99{,}527 & 2{,}592 & 1{,}833 & 1 \\ 102{,}124 & 2{,}363 & 1{,}790 & 1 \\ 99{,}182 & 2{,}363 & 1{,}719 & 1 \\ 97{,}251 & 2{,}507 & 1{,}745 & 1 \\ 99{,}793 & 2{,}469 & 1{,}783 & 1 \\ 101{,}436 & 2{,}596 & 1{,}763 & 1 \end{bmatrix}$$

Aplicando a transformação em $\boldsymbol{\varphi}$, como descrito na Seção B.2 do APÊNDICE B, para

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1/2{,}437 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/0{,}116 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/0{,}057 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/1 \end{bmatrix}, \qquad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 99{,}687 & 2{,}480 & 1{,}776 & 0 \end{bmatrix}$$

A matriz de observação transformada é igual a

$$(\boldsymbol{\varphi} - \mathbf{B}) \cdot \mathbf{A} = \begin{bmatrix} -0{,}0657 & 0{,}9701 & 1 & 1 \\ 1 & -0{,}9995 & 0{,}2402 & 1 \\ -0{,}2076 & -1 & -1 & 1 \\ -1 & 0{,}2359 & -0{,}5399 & 1 \\ 0{,}0432 & -0{,}0897 & 0{,}1145 & 1 \\ 0{,}7175 & 1 & -0{,}2329 & 1 \end{bmatrix}$$

O vetor de parâmetros é calculado pela Equação 86

$$\boldsymbol{\beta} = \begin{bmatrix} 0{,}0001429 - j2{,}778\times10^{-5} & -2{,}533\times10^{-5} + j3{,}381\times10^{-6} \\ 0{,}01331 - j0{,}002664 & -6{,}322\times10^{-6} + j1{,}206\times10^{-6} \\ -2{,}822\times10^{-5} + j5{,}8955\times10^{-6} & 0{,}004869 - j0{,}0006961 \\ 0{,}1421 - j0{,}02843 & 0{,}07573 - j0{,}01083 \end{bmatrix}$$

A partir de **A**, **B** e $\boldsymbol{\beta}$ é possível determinar $c = \begin{bmatrix} 0{,}2890 - j0{,}05776 & 0{,}1506 - j0{,}02154 \end{bmatrix}$

Aplicando a transformação no vetor de parâmetros obtém-se

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = \begin{bmatrix} 5{,}867\times10^{-5} - j1{,}140\times10^{-5} & -1{,}039\times10^{-5} + j1{,}388\times10^{-6} \\ 0{,}1145 - j0{,}02291 & -5{,}437\times10^{-5} + j1{,}037\times10^{-5} \\ -0{,}0004955 + j0{,}0001035 & 0{,}08548 - j0{,}01222 \\ -0{,}1469 + j0{,}02933 & -0{,}07491 + j0{,}01071 \end{bmatrix}$$

Portanto, S_5 = – 0,1469 + j0,02933 VA; S_7 = – 0,07491 + j0,01071 VA e a matriz de correntes já considerando os parâmetros da fundamental é, em miliamperes

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} 2{,}066\angle 143{,}6^\circ & 0{,}4417\angle 144{,}4^\circ & 0{,}09321\angle 73{,}57^\circ \\ 0{,}05976\angle -11{,}00^\circ & 116{,}8\angle -11{,}31^\circ & 0{,}5062\angle 168{,}2^\circ \\ 0{,}01049\angle 172{,}4^\circ & 0{,}05535\angle 169{,}2^\circ & 86{,}35\angle -8{,}136^\circ \end{bmatrix}$$

APÊNDICE E – DADOS DA REDE RADIAL

A Tabela 12 apresenta os dados dos seguimentos da rede radial, mostrada na Figura 7, informando os condutores utilizados e seu comprimento em cada segmento.

Tabela 12 – Dados dos segmentos da rede radial.

Barra A	**Barra B**	**Comprimento (m)**	**Condutor**
18	37	0,00	[a]
37	25	205,77	336,4 MCM CA
25	26	0,00	[a]
26	27	16,49	336,4 MCM CA
27	34	34,88	336,4 MCM CA
34	40	36,08	336,4 MCM CA
40	41	0,00	[a]
41	42	17,98	336,4 MCM CA
42	47	13,93	4 AWG CA
42	29	28,79	4 AWG CA
29	23	20,04	4 AWG CA
42	43	15,23	336,4 MCM CA
43	50	34,18	336,4 MCM CA
50	44	13,42	4 AWG CA
50	52	37,34	336,4 MCM CA
52	53	2,24	336,4 MCM CA
53	46	24,70	4 AWG CA
53	57	12,08	4 AWG CA
57	58	8,93	4 AWG CA
53	62	56,65	1/0 AWG CA
62	66	48,39	2 AWG CA
66	75	64,26	4 AWG CA
66	70	15,26	4 AWG CA
70	69	5,85	4 AWG CA

[a] Este segmento é composto por uma chave.

A Tabela 13 apresenta os dados dos condutores utilizados nos segmentos da rede radial e o Quadro 3 apresenta os dados das cargas conectadas ao sistema.

Tabela 13 – Dados dos condutores utilizados na rede radial.

Descrição do Condutor	**Impedância de Sequência Positiva (Ω/km)**	**Impedância de Sequência Zero (Ω/km)**
1/0 AWG CA	0,605 + *j*0,452	1,052 + *j*1,633
2 AWG CA	0,962 + *j*0,468	1,412 + *j*1,642
336,4 MCM CA	0,190 + *j*0,406	0,693 + *j*1,275
4 AWG CA	1,530 + *j*0,490	1,973 + *j*1,671

Quadro 3 – Dados das cargas utilizados na rede radial.

Barra	**Descrição da Carga**
23	Carga resistiva trifásica de 240 kW em paralelo com carga indutiva trifásica de 100 kVAr em 60 Hz, ambas com tensão base de 11,4 kV.
27	Retificador trifásico de onda completa a diodo (RTOCD) com carga composta por um resistor de 500 Ω em série com um indutor de 1 H.
29	RTOCD com carga de potência constante igual a 1 MW[a].
34	Carga resistiva trifásica de 90 kW em paralelo com carga indutiva trifásica de 45 kVAr em 60 Hz, ambas com tensão base de 11,4 kV.
43	Carga resistiva trifásica de 30 kW em paralelo com carga indutiva trifásica de 30 kVAr em 60 Hz, ambas com tensão base de 11,4 kV.
44	Carga resistiva trifásica de 600 kW em paralelo com carga indutiva trifásica de 255 kVAr em 60 Hz, ambas com tensão base de 11,4 kV.
46	RTOCD com filtro capacitivo de 470 μF e carga composta por um resistor de 500 Ω em série com um indutor de 1 H.
47	RTOCD com carga composta por um resistor de 300 Ω em série com um indutor de 1 H.
58	Carga resistiva trifásica de 150 kW em paralelo com carga indutiva trifásica de 60 kVAr em 60 Hz, ambas com tensão base de 11,4 kV.
62	RTOCD com carga composta por um resistor de 250 Ω em série com um indutor de 1 H.
69	RTOCD com carga composta por um resistor de 230 Ω em série com um indutor de 1 H.
70	RTOCD com carga de corrente constante igual a 60 A.
75	Carga resistiva trifásica de 810 kW em paralelo com carga indutiva trifásica de 300 kVAr em 60 Hz, ambas com tensão base de 11,4 kV.

[a] Esta carga foi implementada com uma fonte de corrente controlada, cujo valor é dado pela razão entre a potência constante e a tensão instantânea sobre a fonte de corrente. Porém, para evitar variações elevadas de corrente, a tensão utilizada neste cálculo passou por um filtro Butterworth de 3ª ordem com frequência de corte igual a 360 Hz.