

Universidade Federal de Juiz de Fora
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Mestrado em Engenharia Elétrica

Pedro da Cruz Loureiro

CONTROLE DE TENSÃO E HARMÔNICOS POR COMPENSADOR ESTÁTICO DE
REATIVOS COM AJUSTE DE PARÂMETROS VIA REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS

Juiz de Fora

2012

Pedro da Cruz Loureiro

Controle de Tensão e Harmônicos por Compensador Estático de Reativos com Ajuste de Parâmetros via Redes Neurais Artificiais

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, área de concentração: Sistemas de Energia, da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. José Luiz Rezende Pereira, Ph.D.

Co-orientador: Prof. Abilio Manuel Variz, D.Sc.

Juiz de Fora

2012

Loureiro, Pedro da Cruz.

Controle de tensão e harmônicos por compensador estático de reativos com ajuste de parâmetros via redes neurais artificiais / Pedro da Cruz Loureiro. – 2012.

130 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)–Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2012.

1.Sistemas elétricos de potência. 2. Redes neurais. I. Título.

CDU 621.3.02

Pedro da Cruz Loureiro

Controle de Tensão e Harmônicos por Compensador Estático de Reativos com Ajuste de Parâmetros via Redes Neurais Artificiais

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Sistemas de Energia, da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 16 de abril de 2012.

BANCA EXAMINADORA

Prof. José Luiz Rezende Pereira, Ph.D.

Prof. Abilio Manuel Variz, D.Sc.

Prof. Antonio Carlos Siqueira de Lima, D.Sc.

Prof. Paulo Augusto Nepomuceno Garcia, D.Sc.

Prof. Leonardo Willer Oliveira, D.Sc.

*Aos meus pais Elizabeth e Marcelo,
ao meu irmão Sérgio,
à minha namorada Marília e
a todos os meus amigos.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pelo dom da vida.

À minha família, em especial aos meus pais Elizabeth e Marcelo e ao meu irmão Sérgio, pelo carinho, compreensão e motivação durante todas as etapas da minha vida.

À minha namorada Marília pelo carinho e motivação, e aos meus amigos, pelo apoio e incentivo constantes, mesmo a distância.

Aos professores Abilio Manuel Variz e José Luiz Rezende Pereira pela dedicação incessante, pelas sugestões pertinentes, pela ética e principalmente, pela paciência durante a realização deste trabalho.

Aos professores Ângelo Rocha de Oliveira e Leonardo Willer Oliveira pelas sugestões e discussões técnicas que em muito contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho e pelo apoio, inclusive, em questões não-acadêmicas.

Aos amigos do curso de mestrado pelo companheirismo, incentivo e discussões técnicas durante este período. A Filipe Magno Mayrink Niquini pela ajuda na parte computacional, sempre de forma muito atenciosa.

Ao professor Edimar José de Oliveira, bem como a todos os demais professores do PPEE, que me acolheram e apoiaram durante este período e ao professor Paulo Ribeiro pelas discussões técnicas.

Ao LABSPOT (Laboratório de Sistemas de Potência da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora), pelo suporte técnico.

À CAPES e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora pelo suporte financeiro.

À Universidade Federal de Juiz de Fora e à Universidade Federal Fluminense, pela excelência no ensino.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Neste trabalho é proposta a aplicação de redes neurais artificiais para ajuste de parâmetros de um compensador estático de reativos, para controle de tensão e harmônicos. Devido à intensa produção de correntes harmônicas e possíveis afundamentos de tensão em instalações industriais como o forno a arco, é necessário um sistema de controle eficiente e robusto. Além disso, os sistemas elétricos de potência se encontram em um cenário com a presença cada vez maior de geração distribuída, cargas não-lineares e forte tendência à operação no contexto das *smartgrids* e *microgrids*. Sendo assim, o suporte de reativos deve ser adequado a esses sistemas, podendo atuar de forma rápida, precisa e confiável. Uma possível solução é a utilização de um compensador estático de reativos (CER) com função adicional de filtragem no ponto onde se deseja controlar a tensão e a distorção harmônica. Entretanto, para o correto funcionamento, é necessário um sistema preciso para o ajuste dos parâmetros do CER, ou seja, determinar os ângulos de disparo dos tiristores e o número de bancos de capacitores a serem ligados. Neste trabalho é proposta uma estratégia de controle via redes neurais artificiais, treinadas para o reconhecimento de padrões de operação em regime permanente e definição da configuração do CER, conferindo inteligência ao equipamento.

Os desenvolvimentos propostos foram implementados no ambiente MatLab®. A validação do método é feita através de simulações em sistemas-teste, presentes na literatura técnica, utilizando o fluxo de potência pelo método de injeção de correntes trifásico harmônico. Os resultados obtidos mostram as vantagens da utilização da estratégia proposta.

Palavras-chave: compensador estático de reativos, redes neurais artificiais, forno a arco, cargas não-lineares, geração distribuída, *smart grids*, *microgrids*, método de injeção de correntes trifásico harmônico.

ABSTRACT

In this work, an artificial neural network-based static var compensator tuning is proposed for voltage and harmonic distortion control. Due to intense harmonic current injection and possible voltage sags produced by industrial facilities such as arc furnaces, an efficient robust control system is needed. Besides, electrical power systems face a new scenario with high penetration of distributed generation and non-linear loads and increased smart grid and microgrid trends. Therefore, the available reactive power sources must be able to provide system control in order to operate the system in a fast, accurate and reliable way. The application of a static var compensator (SVC) with additional filtering function at the controlled node is a possible solution. However, a precise SVC parameters tuning is needed, in order to make the system to work properly. In this work, a control strategy based on artificial neural networks is proposed. The neural networks are trained to recognize steady-state operating patterns and give the SVC adjustment.

The proposed technique was implemented in the MatLab® environment. The methodology is validated by simulations in test-systems available in technical literature, using the three-phase harmonic current injection method power flow. Results show the advantages of the proposed methodology.

Keywords: static var compensator, artificial neural networks, arc furnaces, non-linear loads, distributed generation, smart grids, microgrids, three-phase harmonic current injection method power flow.

Sumário

Capítulo I	
Introdução	1
I.1 Considerações iniciais	1
I.2 Objetivo do trabalho	3
I.3 Ferramentas matemáticas e recursos computacionais utilizados	3
I.4 Estrutura do trabalho	4
I.5 Publicação decorrente da pesquisa	4
Capítulo II	
Revisão bibliográfica	6
II.1 Introdução	6
II.2 Cargas não-lineares e qualidade de energia	7
II.2.1 Fornos a arco	7
II.2.2 Cargas residenciais e comerciais	9
II.2.3 Cargas industriais	10
II.2.4 Outros tipos de carga não-linear	11
II.3 <i>Microgrids</i> e <i>smart grids</i>	11
II.4 Geração distribuída	14
II.4.1 Conexão de parques eólicos	16
II.4.2 Conexão de usinas solares	17
II.5 Conclusões	18
Capítulo III	

Metodologia proposta	19
III.1 Introdução	19
III.2 Método de injeção de correntes trifásico harmônico (MICTH)	20
III.2.1 Modelagem do compensador estático de reativos (CER) com filtros harmônicos	22
III.2.1.1 Reator controlado por tiristor (RCT)	24
III.2.1.2 Filtros harmônicos	26
III.2.2 Modelagem de cargas não-lineares	29
III.2.2.1 Forno a arco	31
III.2.3 Modelagem das fontes de GD	32
III.3 Redes neurais artificiais	34
III.4 Modelo proposto para a estratégia de controle do CER	36
III.4.1 Avaliação das dimensões do CER	37
III.4.2 Algoritmo de aquisição de dados	39
III.4.2.1 Avaliação de resultados	44
III.4.2.2 Função dupla dos filtros harmônicos	45
III.4.2.3 Método da bissecção adaptado	45
III.4.3 Treinamento das redes neurais	46
III.5 Operação do sistema com o controle proposto	49
Capítulo IV	
Resultados	52
IV.1 Apresentação dos resultados	52
IV.2 Sistema IEEE 14 barras com forno a arco	52
IV.2.1 Avaliação das dimensões do CER	55
IV.2.2 Aquisição de dados	56
IV.2.3 Treinamento	58
IV.2.4 Validação	59
IV.3 Sistema 33 barras	66
IV.3.1 Avaliação das dimensões do CER	68
IV.3.2 Aquisição de dados	69
IV.3.3 Treinamento	71
IV.3.4 Validação	72
IV.4 Sistema 9 barras	80
IV.4.1 Avaliação das dimensões do CER	82

IV.4.2 Aquisição de dados	82
IV.4.3 Treinamento	84
IV.4.4 Validação	86
Capítulo V	
Conclusões	95
V.1 Conclusões	95
V.2 Sugestões de trabalhos futuros	96
Apêndice A	
Conceitos básicos sobre redes neurais artificiais	97
A.1 Introdução	97
A.2 O cérebro humano	98
A.3 Modelagem do neurônio artificial	98
A.4 Arquiteturas de rede	100
A.5 Aprendizagem	100
A.6 Treinamento, validação e teste	101
A.7 Generalização do conhecimento	102
Apêndice B	
Método da bissecção	104
Apêndice C	
Dados dos sistemas-teste utilizados	106
C.1 Dados do sistema IEEE 14 barras	106
C.2 Dados do sistema 33 barras	108
C.3 Dados do sistema 9 barras	110
Referências bibliográficas	111

Lista de Figuras

Figura 1 - Modelo do CER	22
Figura 2 - Modelo do sistema com o CER	23
Figura 3 - Modelo do RCT	24
Figura 4 - Corrente e tensão no RCT em regime permanente	24
Figura 5 - Modelo de filtro harmônico utilizado	26
Figura 6 - Módulo da impedância de um filtro LC passivo	27
Figura 7 - Ângulo da impedância de um filtro LC passivo	27
Figura 8 - Modelo de carga não-linear	29
Figura 9 - Modelo de forno a arco	32
Figura 10 - Modelo de geração distribuída	32
Figura 11 - Neurônio artificial	34
Figura 12 - Rede neural <i>feed-forward</i>	35
Figura 13 - Fluxograma das redes neurais	36
Figura 14 - Fluxos de potência para determinação de Q_I e Q_{RCT}	38
Figura 15 - Algoritmo de aquisição de dados	40
Figura 16 - Método da bissecção adaptado	46
Figura 17 - Algoritmo de treinamento da rede neural 1	47
Figura 18 - Algoritmo de treinamento da rede neural 2	48
Figura 19 - Algoritmo de operação do sistema	50
Figura 20 - Sistema 14 barras original	53
Figura 21 - Sistema 14 barras modificado	54
Figura 22 - Carregamento do sistema 14 barras	56
Figura 23- Perfil de tensão no PCC para o sistema 14 barras	57
Figura 24- DHT da tensão no PCC para o sistema 14 barras	57
Figura 25 - Perfil de carga - teste - sistema 14 barras	60
Figura 26 - Perfil de tensão - teste - sistema 14 barras	61
Figura 27- DHT da tensão - teste - sistema 14 barras	61
Figura 28 - Espectro de tensão sem filtros fixos	63
Figura 29- Espectro de corrente injetada sem filtros fixos	63
Figura 30 - Espectro de tensão (teste - sistema 14 barras)	64

Figura 31 - Espectro de corrente injetada (teste - sistema 14 barras)	64
Figura 32 - Sistema 33 barras	66
Figura 33 - Sistema 33 barras modificado	67
Figura 34 - Carregamento do sistema 33 barras	69
Figura 35 - Perfil de tensão para o sistema 33 barras	70
Figura 36 - DHT da tensão no PCC do sistema 33 barras	70
Figura 37 - Perfil de carga - teste 1 - sistema 33 barras	73
Figura 38 - GD - teste 1 - sistema 33 barras	73
Figura 39 - Perfil de tensão - teste 1 - sistema 33 barras	74
Figura 40 - DHT da tensão no PCC - teste 1 - sistema 33 barras	74
Figura 41 - Espectro de tensão no PCC (teste - sistema 33 barras)	76
Figura 42 - Espectro de corrente injetada (teste - sistema 33 barras)	77
Figura 43 - Perfil de carga - teste 2 - sistema 33 barras	77
Figura 44 - GD - teste 2 - sistema 33 barras	78
Figura 45 - Perfil de tensão - teste 2 - 33 barras	78
Figura 46 - DHT da tensão - teste 2 - 33 barras	78
Figura 47 - Sistema 9 barras	80
Figura 48 - Sistema 9 barras modificado	81
Figura 49 - Carregamento do sistema 9 barras	83
Figura 50 - Perfil de tensão para o sistema 9 barras	83
Figura 51 - DHT da tensão para o sistema 9 barras	84
Figura 52 - Perfil de carga - teste 1 - sistema 9 barras	86
Figura 53 - GD - teste 1 - sistema 9 barras	87
Figura 54 - Perfil de tensão - teste 1 - sistema 9 barras	87
Figura 55 - DHT da tensão - teste 1 - sistema 9 barras	88
Figura 56 - Espectro de tensão no PCC (teste - sistema 9 barras)	90
Figura 57 - Espectro de corrente injetada (teste - sistema 9 barras)	91
Figura 58 - Perfil de carga - teste 2 - sistema 9 barras	91
Figura 59 - GD - teste 2 - sistema 9 barras	92
Figura 60 - Perfil de tensão - teste 2 - 9 barras	92
Figura 61 - DHT da tensão - teste 2 - 9 barras	92
Figura 62 - Funções de ativação	99
Figura 63 - Método da Bissecção	105

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Critério de decisão para o método da bissecção adaptado	46
Tabela 2 - Carregamento mínimo e máximo do sistema 14 barras	55
Tabela 3 - Dados do CER para o sistema 14 barras	55
Tabela 4 - Desempenho da rede neural RNA ₁ para o sistema 14 barras	58
Tabela 5 - Desempenho da rede neural RNA ₂ para o sistema 14 barras	59
Tabela 6 - Controle para o teste - sistema 14 barras	62
Tabela 7 - Carregamento mínimo e máximo do sistema 33 barras	68
Tabela 8 - Dados do CER para o sistema 33 barras	69
Tabela 9 - Desempenho da rede neural RNA ₁ para o sistema 33 barras	71
Tabela 10 - Desempenho da rede neural RNA ₂ para o sistema 33 barras	72
Tabela 11 - Controle para o teste 1 - sistema 33 barras	75
Tabela 12 - Controle para o teste 2 - sistema 33 barras	79
Tabela 13 - Carregamento mínimo e máximo do sistema 9 barras	82
Tabela 14 - Dados do CER para o sistema 9 barras	82
Tabela 15 - Desempenho da rede neural RNA ₁ para o sistema 9 barras	85
Tabela 16 - Desempenho da rede neural RNA ₂ para o sistema 9 barras	85
Tabela 17 - Controle para o teste 1 - sistema 9 barras	89
Tabela 18 - Controle para o teste 2 - sistema 9 barras	93
Tabela 19 - Dados do sistema IEEE 14 barras	106
Tabela 20 - Dados de linha - sistema IEEE 14 barras	107
Tabela 21 - Dados do sistema 33 barras	108
Tabela 22 - Dados de linha - sistema 33 barras	109
Tabela 23 - Dados do sistema 9 barras	110
Tabela 24 - Dados de linha - sistema 9 barras	110

Capítulo I

Introdução

I.1 Considerações Iniciais

Com o desenvolvimento tecnológico e da atividade industrial, a demanda energética, tanto para aplicações industriais como residenciais, se tornou maior e mais complexa nos últimos anos. Além do crescimento do número de consumidores, houve, também, um crescimento da preocupação com relação à qualidade da energia elétrica fornecida e o impacto causado ao meio ambiente devido à produção e uso da mesma. Sendo assim, é importante considerar o caráter estratégico e determinante que o suprimento energético apresenta em todos os processos produtivos (SANTOS *et al.*, 2001).

Considerando essas questões, os sistemas elétricos de potência (SEP) devem estar adequados às necessidades dos seus consumidores. A tensão fornecida deve ter uma forma de onda o mais próximo possível de uma senóide, evitando, assim, perdas, oscilações de tensão e danos a equipamentos eletrônicos (VARIZ, 2006; EBRAHIMIRAD *et al.*, 2008). Adicionalmente, a presença de cargas não-lineares provoca perturbações na energia entregue, sob forma de tensões e correntes harmônicas que se propagam pelo sistema, dificultando a operação ideal do mesmo (VARIZ, 2006).

Entre as cargas não-lineares, uma das que atribuem maior severidade à operação dos sistemas é o forno a arco (SALOR *et al.*, 2010). O princípio de funcionamento deste equipamento baseia-se na formação de um arco voltaico cuja impedância associada é variável, não-linear e de difícil modelagem. Como consequências, tem-se distorção harmônica e afundamento de tensão elevados, comprometendo a qualidade de energia.

Outro fator importante para a qualidade da energia é a presença cada vez maior da Geração Distribuída (GD), como conseqüência do avanço tecnológico e da preocupação com as questões ambientais. Tradicionalmente, os sistemas de distribuição apresentam uma estrutura onde o fluxo de potência é unidirecional, da geração para as cargas. Entretanto, no contexto da GD, essa estrutura apresenta fluxo de potência bidirecional nas linhas, onde a potência consumida por uma carga pode ser fornecida ora pela rede de transmissão (subestação), ora pela GD. Esta característica requer um controle mais preciso, baseado em equipamentos de medição e proteção inteligentes (HAMIDI *et al.*, 2010). Nesse contexto, deve-se levar em consideração o comportamento das fontes geradoras, tais como células fotovoltaicas, turbinas eólicas, micro-turbinas, Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH's) e células combustíveis, bem como sua conexão com a rede de distribuição e o impacto causado por essas fontes no sistema elétrico (CHOWDHURY *et al.*, 2009).

Dentro deste cenário surge um novo conceito para a operação da rede, o conceito de *Microgrid*, onde uma parte do sistema de distribuição compreendendo GD e cargas associadas podem ser isolados do resto do sistema e/ou operados separadamente, aumentando a eficiência e confiabilidade do mesmo (LASSETER e PAIGI, 2004). Além disso, as *Smart Grids* ou redes inteligentes representam uma tendência para os sistemas elétricos de potência, o que traz novas soluções e novos desafios para a operação dos mesmos (HAMIDI *et al.*, 2010).

A fim de possibilitar a implementação de *Microgrids* e viabilizar a operação de cargas severas como o forno a arco, é necessário promover controle de tensão e harmônicos adequado ao contexto de operação inteligente. Este requisito de controle se deve, também, às características não-lineares dos equipamentos de conversão de potência associados à GD e das próprias cargas do sistema. Portanto, com intuito de manter a qualidade da energia em níveis aceitáveis para estes casos, uma possível solução é a utilização de compensador estático de reativos (CER, *Static var Compensator* - SVC), associado a filtros harmônicos. Estes equipamentos operam junto ao Ponto de Conexão Comum (*Point of Common Coupling* - PCC) de um subsistema industrial contendo cargas não-lineares como forno a arco, por exemplo, ou da *microgrid*, proporcionando eficiência, confiabilidade e qualidade de energia (BOGONEZ-FRANCO *et al.*, 2011).

I.2 Objetivo do trabalho

O presente trabalho tem como objetivo a apresentação de uma metodologia para controle de tensão e harmônicos em SEP, em regime permanente, através de CER composto de reator controlado por tiristor (RCT) e banco de capacitores com função adicional de filtragem harmônica. Para tanto, a metodologia proposta utilizará de redes neurais artificiais para o ajuste de parâmetros deste CER. Dessa forma, o afundamento de tensão e a distorção harmônica são compensados pelo equipamento, devidamente ajustado de acordo com as características de operação do sistema. A estratégia adotada é adequada tanto para cargas com alto índice de distorção harmônica, tais como fornos a arco, como para *microgrids* e redes com presença de GD.

Em outras palavras, o controle proposto tem como finalidade a redução da distorção harmônica e manutenção do nível de tensão, em regime permanente, em um ponto de conexão comum (PCC) entre um dado subsistema de interesse e o resto do sistema. Portanto, o objetivo do trabalho é desenvolver uma metodologia que permita analisar a possível implementação de subsistemas contendo não-linearidades como as citadas anteriormente, sem que o sistema seja prejudicado. Ressalta-se que os equipamentos presentes em *microgrids* já devem conter filtros.

Os procedimentos para a implementação desta metodologia são agrupados em três partes: (i) dimensionamento do CER e dos filtros; (ii) simulação de diferentes cenários de carga e geração distribuída para obtenção dos dados de entrada e saída das redes neurais; e (iii) treinamento das RNA's. Após o treinamento, uma nova série de simulações é feita para a verificação da precisão das RNA's e validação do método.

Sendo assim, no presente trabalho é proposta uma contribuição com relação às técnicas para controle de tensão através da compensação estática de rativos. O controle baseado em RNA's imprime inteligência ao equipamento, tornando-o adaptável a diversos cenários de operação, para diversas aplicações.

I.3 Ferramentas matemáticas e recursos computacionais utilizados

Para a realização dos estudos propostos foi utilizado o algoritmo de fluxo de potência pelo método de injeção de correntes trifásico harmônico (MICTH), descrito em

(VARIZ, 2006). As redes neurais foram implementadas através da *Neural Networks Toolbox*, ferramenta do programa computacional MatLab®.

I.4 Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido em 5 capítulos e 3 apêndices. Neste primeiro capítulo foi apresentada uma introdução aos problemas decorrentes da presença de cargas não-lineares, entre elas, o forno a arco, em sistemas elétricos de potência, considerando a presença de *microgrids* e GD.

O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica, onde se apresentam trabalhos relativos a afundamento de tensão e distorção harmônica devido a cargas não-lineares, bem como equipamentos de controle para redes inteligentes e sistemas com presença de geração distribuída.

O terceiro capítulo apresenta a metodologia proposta, com a inclusão do CER e do controle por redes neurais artificiais.

No quarto capítulo encontram-se os resultados para validação da metodologia proposta, obtidos através de simulações da estratégia de controle em sistemas-teste.

No quinto capítulo apresentam-se as principais conclusões do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

O apêndice A apresenta os conceitos associados às redes neurais artificiais. O apêndice B, por sua vez, apresenta o método da bissecção utilizado no algoritmo proposto. Por fim, o apêndice C apresenta dados dos sistemas-teste utilizados neste trabalho.

I.5 Publicação decorrente da pesquisa

Em decorrência da pesquisa realizada na elaboração desta dissertação, o seguinte trabalho foi publicado:

- LOUREIRO, P. C.; VARIZ, A. M.; OLIVEIRA, A. R.; OLIVEIRA, L. W.; PEREIRA, J. L. R.; GARCIA, P. A. N.; NIQUINI, F. M. M.; RIBEIRO, P. F., “*Static var Compensator Sizing for Microgrid Application*”, publicado no IX congresso latino-americano de geração e

transmissão de energia elétrica (CLAGTEE), Mar Del Plata, Argentina,
novembro de 2011.

Capítulo II

Revisão bibliográfica

II.1 Introdução

Devido às novas exigências sobre qualidade de energia e à tendência atual de implementação de sistemas inteligentes (HAMIDI *et al.*, 2010; SANTOS *et al.*, 2001), diversos trabalhos foram realizados, propondo técnicas de mitigação de problemas como afundamento de tensão e distorção harmônica. Dentre as tecnologias difundidas atualmente estão os dispositivos FACTS, associados a controles automáticos.

O compensador estático de reativos (CER) apresenta excelentes resultados no controle de tensão e suporte de potência reativa em sistemas com cargas não-lineares e variantes no tempo. Devido à sua flexibilidade e rapidez de operação, o CER apresenta-se como uma solução confiável para atuar em sistemas contendo cargas como o forno a arco (SALOR *et al.*, 2010). Além disso, as *microgrids*, no contexto das *smart grids*, demandam técnicas e equipamentos capazes de promover o controle adequado a redes inteligentes (LASSETER e PAIGI, 2004).

Neste capítulo são descritos os conceitos e métodos presentes na literatura sobre os assuntos abordados anteriormente, a fim de apresentar as linhas de pesquisa atuais. Dentre estas, encontram-se trabalhos contemplando equipamentos e estratégias diversas para sistemas com cargas não-lineares como o forno a arco, instalações industriais, comerciais e residenciais. Além disso, apresentam-se estudos envolvendo *smart grids*, *microgrids* e geração distribuída.

II.2 Cargas não-lineares e qualidade de energia

A presença de cargas não-lineares implica na injeção de correntes harmônicas, sendo que aproximadamente 50% da energia elétrica passa por dispositivos eletrônicos contendo elementos que provocam mudanças de estado entre modo de condução e interrupção (SANTOS *et al.*, 2001). Além disso, alguns dos equipamentos destinados ao controle de tensão e, inclusive, de eliminação de harmônicos são ao mesmo tempo fontes de distorção.

Uma estratégia para evitar o efeito da produção de harmônicos pelo próprio equipamento de controle é apresentada em KULKARNI e UDUPI (2010). Neste trabalho, a tecnologia dos equipamentos CER e STATCOM são comparadas, sendo o primeiro considerado a opção com melhor custo-benefício. Para realizar o controle, os parâmetros do CER, do tipo CCT-RCT (Capacitor chaveado por tiristor – reator controlado por tiristor, ou *thyristor-switched capacitor – thyristor-controlled reactor*) são definidos via três redes neurais artificiais, sendo o ângulo de disparo de cada fase definido por uma RNA diferente. Após a análise dos resultados, conclui-se que a operação do equipamento com múltiplos ângulos de disparo, determinados pelas redes neurais, proporciona balanceamento e controle do nível de tensão, mantendo, ao mesmo tempo, uma distorção harmônica mínima.

II.2.1 Fornos a arco

Um tipo de carga conhecido pela produção de correntes harmônicas é o forno a arco, utilizado na indústria siderúrgica. As distorções são decorrentes da impedância aleatória do arco voltaico produzido (VARIZ, 2006).

Em (USUKI *et al.*, 2011) é demonstrado através de modelos e de exemplos práticos a possibilidade de se compensar flutuações de tensão em instalações contendo fornos a arco. A solução é baseada na aplicação de um compensador estático de reativos (CER) e filtros harmônicos, sendo os filtros fixos e os parâmetros do CER ajustados por um controle dinâmico.

Uma abordagem mais sofisticada é proposta em (CHIA-NAN KO *et al.*, 2009). Neste trabalho utiliza-se um algoritmo de otimização pelo método do enxame de partículas com evolução não-linear variante no tempo para determinar a alocação de

filtros harmônicos em redes com alto número de fontes harmônicas. Um sistema-teste contendo fornos a arco foi utilizado para a demonstração da eficácia do método na determinação dos parâmetros ótimos dos filtros a serem instalados.

Levando em conta que os processos envolvidos na fabricação de aço incluem processos estocásticos, dificultando a modelagem precisa do forno a arco, uma modelagem simplificada onde o equipamento é representado por uma reatância indutiva fixa em série com uma resistência variável é proposta em (DONSIÓN *et al.*, 2010). O modelo conta com um CER e um transformador contendo enrolamento terciário para controle de tensão. Em seguida, são realizadas simulações para obtenção de dados para validação do modelo e verificação do impacto do controle via CER na forma de onda e no módulo da tensão. Os resultados mostram que a distorção harmônica na tensão praticamente não se altera com relação ao valor antes do acionamento do forno, entretanto, a distorção na corrente chega um valor próximo do dobro. Isso se deve à natureza dos componentes do CER que produzem correntes harmônicas. Neste trabalho, o método de controle dos disparos do CER não é especificado.

Considerando a dificuldade de modelagem dos fornos a arco, uma alternativa é a modelagem prática, baseada em dados observados. Segundo os autores de (GILDONG KIM e HANMIN LEE, 2009), a estratégia proporciona a análise dos efeitos do fenômeno conhecido como *flicker*, isto é, pequenas variações rápidas na tensão, e a proposição de soluções. Sendo assim, é feita a aquisição dados da operação de uma usina siderúrgica real, em seguida, o forno a arco é modelado como uma fonte de correntes harmônicas baseadas nesses dados. Para a redução do efeito *flicker*, a técnica adotada é a simulação de sucessivos casos utilizando o modelo de forno a arco apresentado neste trabalho e um CER com vários valores de potência. Ao final do processo, obtém-se a capacidade ótima para o CER, capaz de proporcionar a redução da oscilação de tensão a um nível aceitável.

Em (SALOR *et al.*, 2010) aborda-se a questão da qualidade de energia em sistemas onde há presença de fornos a arco. Neste trabalho encontra-se um método de obtenção de dados por amostragem. A partir dos dados de cinco usinas siderúrgicas reais, é avaliada a relação entre a presença dos atuais CER's e a amplificação de inter-harmônicos próximos à ordem 2, principais causadores de *flicker*. Sendo assim, a seleção adequada do ponto de conexão com a rede existente e o dimensionamento cuidadoso de filtros harmônicos associados aos CER's são de extrema importância para o funcionamento seguro das instalações. Além disso, outras soluções como flitros ativos

e STATCOM's devem ser exploradas, segundo a referência, tendo em vista a redução de inter-harmônicos.

II.2.2 Cargas residenciais e comerciais

Sistemas de distribuição são tipicamente desbalanceados e sujeitos a distorção harmônica, devido à presença de equipamentos comuns, utilizados em larga escala como lâmpadas fluorescentes, computadores, televisores, entre outros aparelhos domésticos (SANTOS *et al.*, 2001). Além disso, devido à típica configuração radial, o afundamento de tensão é mais evidente.

Com relação ao afundamento de tensão e conseqüentes perdas, uma solução interessante é encontrada em OLIVEIRA (2009). Neste trabalho apresenta-se uma metodologia para reconfiguração e alocação ótima de capacitores em sistemas de distribuição, a fim de minimizar perdas. O algoritmo proposto realiza um processo iterativo de otimização via programação não-linear inteira mista, dividido em passos, onde o método primal-dual dos pontos interiores é utilizado para a otimização em cada passo. Além disso, um índice de sensibilidade do sistema a alterações topológicas é elaborado para a solução do problema de reconfiguração. Dessa forma, a alocação de capacitores associada à reconfiguração do sistema proporciona a operação mais eficiente do mesmo.

Algumas soluções como instalação de bancos de capacitores e controle por tap de transformador são abordadas em KATIRA e PORATE (2009), em especial os dispositivos FACTS, tais como CER, compensador estático síncrono (STATCOM), capacitor série controlado por tiristor (TCSC – *Thyristor Controlled Series Capacitors*), e transformador controlado por tiristor (TCT), mostrando-se importantes ferramentas para o controle de tensão e fluxo de potência. Entretanto, as tecnologias FACTS ainda são caras e não estão amplamente difundidas em sistemas de distribuição. Através de um estudo de caso, onde é simulado o controle de tensão via CER em uma subestação de distribuição, é demonstrada a eficácia do equipamento no controle de tensão, fator de potência e redução de perdas.

Uma modelagem de carga *fuzzy* é proposta em DENG e REN (2003), a fim de representar cargas flutuantes contendo incertezas inerentes aos sistemas de distribuição radiais. A partir do modelo, o suporte de reativos é projetado para atuar através de

bancos de capacitores chaveados, uma prática amplamente utilizada, segundo os autores, em sistemas dessa natureza. Sendo assim, os autores expõem um modelo simples e rápido, adequado à operação *online*, diferentemente de algoritmos baseados em programação inteira mista. Por outro lado, a metodologia requer um conhecimento avançado do sistema a ser controlado para que as funções de pertinência *fuzzy* sejam adequadamente ajustadas.

II.2.3 Cargas industriais

No setor industrial a qualidade de energia vem se tornando um requisito cada vez mais importante. Ao passo que as instalações industriais incorporam mais equipamentos de alta tecnologia, a necessidade de fornecimento de energia altamente confiável se torna mais importante (EBRAHIMIRAD *et al.*, 2008). Uma solução é a adoção de uma estratégia de controle linear simples para um CER, baseado na relação entre a queda de tensão e a susceptância do CER. Resultados mostram que a solução proposta proporcionou um melhoramento significativo no perfil de tensão, em regime permanente, para cargas variando rapidamente.

Em BARONA *et al.* (2007) apresentam-se dois equipamentos desenvolvidos para a eliminação de problemas como afundamentos de tensão, distorção harmônica, interrupções de fornecimento e sobretensões transitórias. Uma das alternativas é baseada na adoção de dispositivos de controle associados a armazenadores de energia como baterias ou super-capacitores. Já a outra alternativa não faz uso de armazenadores de energia, para consumidores com capacidade de operação isolada do sistema. Os resultados mostram a eficácia de ambos os métodos em diversas instalações industriais. Entretanto, o tipo de controle em particular não é revelado pelos autores.

Um método simples, baseado no registro de distúrbios ocorridos é proposto em EL MOFTY e YOUSSEF (2001). Nesse caso, são realizadas medições de tensão, frequência, distorção harmônica, entre outros índices, a cada 15 minutos em um período de 7 dias. Posteriormente, as medições registradas são analisadas a fim de determinar a melhor técnica para mitigação do problema. Entre as possíveis técnicas adotadas neste trabalho encontram-se: proteção contra surtos, correção do fator de potência, instalação de regulador de tensão e instalação de filtros harmônicos. A validação do método é feita através do estudos de caso em instalações industriais reais.

II.2.4 Outros tipos de carga não-linear

Algumas cargas requerem atenção especial, ora na demanda de energia de qualidade ora na responsabilidade de não causar distúrbios à rede. Dessa forma, a energia entregue deve ser de qualidade, para que equipamentos presentes em instalações que necessitem de energia confiável tais como hospitais não sejam afetados. Em DALOUB (2011) é feita a modelagem de um CER para mitigar problemas de tensão, harmônicos e correção do fator de potência em uma instalação hospitalar. Entretanto, para o correto funcionamento é necessário modelar precisamente as cargas presentes.

Por outro lado, sistemas de transporte por tração elétrica representam uma fonte de harmônicos, devido ao movimento do veículo e dos dispositivos utilizados na alimentação do mesmo (impedância de contato variável). Como pode ser visto em MARTINEZ e RAMOS (2010), é possível reduzir o impacto no perfil de tensão e na distorção harmônica do sistema de distribuição através da aplicação de um CER e filtros harmônicos dimensionados para manter a tensão em níveis aceitáveis e baixa distorção harmônica. Neste trabalho, um modelo de carga não-linear é apresentado, simulando os distúrbios causados por um veículo acionado por tração elétrica e os resultados mostram que a alternativa foi eficaz no seu propósito.

II.3 *Microgrids e Smart Grids*

A operação de sistemas elétricos cada vez mais próxima dos limites e a evolução industrial em direção a um cenário de fluxo de potência bidirecional traz novos desafios (HAMIDI *et al.*, 2010). As *smart grids* envolvem tecnologias alternativas que permitem maior competição entre fornecedores de energia e o uso intermitente de fontes de energia, conjugando a geração em grande escala com a geração distribuída. Segundo o autor mencionado, as conseqüências positivas são:

- maior confiabilidade conferida ao sistema pelo uso de sistemas avançados de comunicação e monitoramento em tempo real e, assim, a possibilidade de redução de interferência humana;
- flexibilidade devido à diversidade de opções de formas de geração e operação tanto pelo lado da demanda como pelo do fornecimento,

resultando em preços mais competitivos, maior confiabilidade e menores impactos ao meio ambiente;

- eficiência proporcionada pelo caráter mais ativo das redes de distribuição, dividindo responsabilidades com relação à estabilidade do sistema;
- retorno ambiental sob diversas formas, desde a inclusão de fontes de energia renovável como parte da geração distribuída até a redução de vazamentos de SF₆ em subestações isoladas a gás, devido à presença de medidores inteligentes e equipamentos automáticos de ação rápida.

Por outro lado, embora muitas das tecnologias necessárias para a implementação de redes inteligentes já estejam disponíveis, a relação entre custo e retorno financeiro ainda representa uma barreira. Além disso, redes dessa natureza trazem a necessidade de reestruturação da indústria, compatibilização com as instalações já existentes e maior poder de compra para pequenos fornecedores.

Em LASSETER e PAIGI (2004) é mostrado que a aplicação individual de geradores distribuídos pode causar tantos problemas quanto pode resolver. A solução proposta é uma abordagem onde geradores distribuídos e cargas associadas formam um subsistema independente, definido como *Microgrid*. Dessa forma, a inclusão de fontes alternativas de energia se torna viável, com implicações positivas sobre a confiabilidade e eficiência do sistema. Entretanto, para que a *Microgrid* possa ser implementada, um controle rígido de tensão, fluxo de potência nos alimentadores e potência gerada pelas micro-fontes se faz necessário. Outro aspecto importante é a necessidade de dispositivos que permitam desconectar suavemente o subsistema do resto da rede e conectá-lo novamente sem causar danos ao sistema como um todo.

A questão das pequenas fontes de energia renovável atuando no sistema é abordada em XU WEI *et al.* (2009), sendo a ação rápida na operação da rede e a compatibilização das fontes de energia distribuídas, consideradas o núcleo de uma *smart grid*. A geração distribuída eficiente é tratada como um meio técnico importante para a economia de energia e redução da emissão de poluentes.

Um modelo experimental para pequenos sistemas contendo cargas não-lineares é apresentado em MOK *et al.* (2011). Neste trabalho, um conjunto de cargas com fontes de correntes harmônicas é modelado para representar uma futura *Microgrid*. Os testes são conduzidos de forma a definir o melhor lugar para o PCC, de forma que a rede de baixa tensão tenha a menor distorção possível. Este modelo pode ser adaptado para

qualquer sistema contendo fontes de correntes harmônicas e pode ser usado para a implementação de *Microgrids*.

Considerando a relevância da qualidade de energia nas *Microgrids*, uma estratégia apresentada em BOGONEZ-FRANCO *et al.* (2011) propõe a aplicação de um protótipo de um CER do tipo CCT-RCT de baixo custo, com capacidade de suporte entre 1 kvar indutivo e 3 kvar capacitivo. Em conjunto são utilizados medidores e conversores digitais para aquisição de dados e um controlador proporcional-integral-diferencial (PID), sendo o equipamento capaz de manter a tensão controlada com desvios inferiores a 2% do valor estabelecido. Outro aspecto interessante é a possível adaptação, segundo os autores, desta técnica para sistemas com potências mais altas.

Em QIANG SUN *et al.* (2010) é feita uma comparação entre tecnologias *smart grid* na China e no Reino Unido. Nota-se neste trabalho que em países diferentes as definições de *smart grid* são distintas. A principal diferença é que a ênfase chinesa é voltada para a transmissão e distribuição geograficamente desbalanceada, em um cenário de forte crescimento econômico, enquanto a ênfase britânica compreende os aspectos ambientais e de energia segura e de baixo custo. O ponto comum é que, em ambos os casos, a implementação de redes similares depende de tecnologia avançada de medição inteligente, comunicações, controle e sistemas automáticos.

Os benefícios da implementação de uma rede inteligente na Índia são estudados no trabalho encontrado em SINHA *et al.* (2011), enfatizando as melhorias com relação a perdas técnicas e comerciais, redução da carga de pico, possibilidade de incorporação de GD e melhor qualidade de energia.

Em ALDANA *et al.* (2011) é proposto um guia para a implementação de *smart grids* na Colômbia, com o objetivo de manter o sistema elétrico do país atualizado tecnologicamente e mais eficiente. O processo é gradual e cuidadosamente planejado conforme as seguintes etapas:

- conceituação (2011 – 2012) – percepção da importância de direcionar os estudos para as novas tecnologias, modelos teóricos, sendo estudos internacionais conduzidos e projetos formulados;
- desenvolvimento (2012 – 2025) – novas tecnologias inteligentes e eficientes são incorporadas ao sistema elétrico, adotando tendências internacionais em projetos específicos;
- consolidação (2026 em diante) – a cultura energética do país é orientada para sistemas eficientes e com mínimo impacto ambiental.

Essa iniciativa é chamada de *Colombia Inteligente*, um programa estratégico nacional a fim de obter os benefícios esperados para o sistema elétrico.

Observando a evolução do conceito de *smart grids* pelo ponto de vista do consumidor, em MOSHARI *et al.* (2010) é abordada a questão da inclusão do mesmo nas decisões relacionadas aos sistemas elétricos. Uma vez que a rede possui pequenos centros de geração, medição e controle distribuídos, os próprios consumidores influenciam no preço da energia em sistemas competitivos e nas decisões operacionais, assumindo uma responsabilidade antes exclusiva dos fornecedores. Como consequência o sistema todo se torna mais eficiente.

Outras tecnologias emergentes e de acentuada relevância são os veículos elétricos com carregamento do tipo *plug-in* e pequenos geradores locais associados a super-capacitores. Uma combinação de geração distribuída baseada em fontes renováveis, conexão à rede existente, armazenamento de energia em super-capacitores e atendimento a cargas locais inclusive veículos elétricos é proposta em YONGHUA CHENG (2011). Nesse contexto, o controle pelo lado do consumidor assume papel ativo na manutenção da estabilidade do sistema.

II.4 Geração distribuída

A incorporação de fontes renováveis de energia aos sistemas elétricos está se difundindo em escala mundial (GOMES *et al.*, 2009). Entretanto, os modelos para esse tipo de geração ainda estão em fase de estudo, a fim de representar corretamente seu funcionamento quando conectados ao sistema. Tais estudos levam em conta o fato de que as características transitórias e em regime permanente das fontes de GD para cumprir os requisitos de segurança e eficiência do sistema são diferentes das referentes a sistemas tradicionais de geração de grande porte. Neste trabalho, verifica-se que, devido à pressão sobre os investidores com relação ao aspecto ambiental, o número de projetos contemplando fontes de GD limpas está crescendo no Brasil, em especial biomassa e parques eólicos.

Em CHIRADEJA (2005), a presença de geração distribuída contribui para a redução de perdas, considerando a operação em ambiente não regulamentado. A inclusão de GD em nível de distribuição resulta em vários benefícios como alívio de fluxo nas linhas, redução de perdas, melhoramento no perfil de tensão e redução da

demanda de pico. Sendo assim, o sistema em geral opera de forma mais eficiente e com mais qualidade de energia. Contudo, o impacto da aplicação depende do local de inserção dos geradores distribuídos, do fator de potência e da capacidade dos mesmos.

A questão da conexão de parques eólicos é explorada em CHOWDHURY *et al.* (2009), com ênfase no ilhamento eficaz de *Microgrids* com fontes de energia eólica. Para este fim, os geradores são tratados como barras PQ quando o *Microgrid* está conectado ao sistema e como V-f (tensão e frequência constantes) quando isolado. O controle V-f mantém a tensão e frequência do subsistema dentro de uma faixa aceitável, sendo a eficácia da técnica comprovada pelas simulações realizadas. Por outro lado, a proposta requer mudanças na regulamentação correspondente a esse modo de operação, além de haver a necessidade de um sistema de segurança rigoroso para a sincronização durante a reconexão e de apropriada coordenação da proteção.

Em GAMA *et al.* (2009) é abordada a questão contratual, levando em conta as características comerciais das contratações em GD. Seu trabalho propõe uma técnica que permita a adequação das decisões contratuais, conforme a regulamentação brasileira, a fim de promover flexibilidade e eficiência ao sistema e estimular investimentos na área. No entanto a metodologia, baseada em um processo de mapeamento e aquisição de dados dos possíveis produtores alternativos, depende do compromisso dos mesmos em colaborar para com a eficiência do processo.

Tendo em vista o aspecto econômico, encontra-se em ZENG MING *et al.* (2010) um método de compensação de capacidade para GD no contexto das *smart grids*. O método consiste em quantificar a confiabilidade conferida por produtores independentes e o impacto financeiro sobre a companhia de distribuição de energia elétrica, a fim de estimular investimentos em GD em paralelo com o planejamento das distribuidoras.

Outro aspecto importante é o de que a interface entre fontes de geração de energia renováveis e o sistema é feita através de controladores, inversores de frequência entre outros dispositivos. Sendo assim, a análise de curto-circuito se torna mais complexa (JIN QIANG *et al.*, 2011). Verifica-se que, quando o subsistema está conectado à rede a corrente de curto-circuito é muito maior do que quando o mesmo opera isolado. A solução proposta neste trabalho é a formulação de dois parâmetros para estimar a diferença de capacidade de fontes equivalentes de GD e o impacto causado ao sistema com relação à sua proteção.

Um esquema de controle em série para redes com cabos subterrâneos é proposto em DE GRAAFF *et al.* (2005), onde um auto-transformador é associado a um ajuste de

tap controlado eletronicamente para controle de tensão em um subsistema com presença de geradores distribuídos. Neste trabalho é possível verificar que o suporte de reativos não é o mais eficaz para controle de tensão em redes subterrâneas com presença de GD. Sendo assim, o controlador em série permite a redução da variação de tensão na rede, comparado à redução conferida pelo suporte de reativos por capacitores no final do alimentador.

II.4.1 Conexão de parques eólicos

Os parques eólicos utilizam geradores de indução, geradores síncronos com rotor bobinado ou geradores síncronos com ímã permanente conectados às turbinas (HYONG SIK KIM e LU, 2010). De qualquer forma, devido à variação de velocidade de rotação das turbinas conforme a velocidade do vento é necessária a aplicação de dispositivos de eletrônica de potência a fim de manter a tensão e frequência constantes. Como consequência, há injeção de correntes harmônicas decorrente do uso desses equipamentos.

Outro aspecto é o do compromisso das usinas eólicas com relação ao funcionamento do sistema como um todo, participando ativamente durante distúrbios na rede (ZHE CHEN *et al.*, 2009). Neste trabalho é mostrada a necessidade dessas usinas de possuir equipamentos de suporte, de forma que atuem do mesmo modo que as usinas convencionais. Para tanto, os dispositivos FACTS, tais como CER e STATCOM se apresentam como importantes tecnologias para o desenvolvimento de soluções e conceitos de geração e controle.

Em HAMIDI e SMITH (2011) é abordado o conceito de *smart grid* aplicado a usinas eólicas *offshore*. Para os autores, o suporte de reativos pode ser feito via dispositivos FACTS, promovendo:

- compensação de potência dinâmica e em regime permanente;
- estabilidade transitória e em regime permanente;
- maior capacidade de transmissão de energia;
- menor corrente de curto-circuito ;
- redução de perdas;

Entretanto, equipamentos como o CER e o STATCOM ainda têm custos elevados e, portanto, sua aplicação ainda é pouco presente na distribuição.

Uma aplicação de CER para integração de um parque eólico à rede é apresentada em NARIMANI e VARMA (2010). Neste trabalho é mostrada a incapacidade dos bancos de capacitores de evitar colapso de tensão em redes contendo parques eólicos. Como alternativa, é proposta a instalação de um CER com parâmetros definidos por um controlador *fuzzy*. A fim de validar a metodologia, realizam-se simulações computacionais para situações de curto-circuito, comparando, em seguida, os resultados dos controladores *fuzzy* e proporcional-integral (PI). A partir dos resultados conclui-se que o desempenho do CER é mais eficiente com controle *fuzzy* do que quando associado ao controle do tipo PI.

II.4.2 Conexão de usinas solares

Uma das fontes de energia renovável em crescimento atualmente é a energia solar, pois são de fácil alocação com baixa necessidade de manutenção e sem custos relacionados a combustíveis. Além disso, a energia solar representa uma fonte inesgotável e limpa. Entretanto, a conexão de células fotovoltaicas à rede é complexa, necessitando de dispositivos de eletrônica de potência como conversores e inversores, resultando na produção de correntes harmônicas. Tendo em vista esse cenário, os autores de MOLINA *et al.* (2010) propõem um esquema de conexão com controladores multinível e inversor de frequência, associados a filtros harmônicos e um transformador no PCC. Os resultados de simulações em um caso-teste mostram a eficácia da técnica utilizada, sendo o modelo capaz de responder rapidamente à demanda de potência ativa do sistema, independentemente da potência reativa, portanto, sem comprometimento da qualidade e do nível da tensão.

Em JAHDI *et al.* (2011) é apresentado um modelo híbrido solar-eólico, onde a compensação de potência reativa é feita em cada fonte via bancos de capacitores. A conexão dos geradores é feita através de conversores DC/AC, para que ambas as fontes operem concomitantemente, compensando uma à outra, dependendo das condições de luz e vento. A validação do modelo é proporcionada pelos resultados da sua simulação em uma rede-teste. Contudo, o funcionamento conforme o esperado depende das condições do vento durante o período da noite, onde a seção eólica do arranjo compensa a falta de luz solar para as células fotovoltaicas.

O impacto da inclusão de usinas solares nas redes elétricas é abordado em ALQUTHAMI *et al.* (2010). Neste estudo é verificada a vulnerabilidade do sistema com o aumento do número de fontes solares. A partir de resultados de simulações, verifica-se que o crescimento do número de fontes solares o sistema se torna mais propenso a problemas de estabilidade de tensão. Sendo assim, a necessidade de sistemas adequados de suporte de reativos e regulamentações apropriadas fica evidente.

II.5 Conclusões

Este capítulo apresentou os principais conceitos, bem como uma revisão bibliográfica pertinente ao tema desta dissertação, ou seja, cargas não-lineares, incluindo o forno a arco, compensação estática de potência reativa, controle de tensão, qualidade de energia, *microgrids* e geração distribuída. Considerando a pesquisa realizada, nota-se a necessidade de se desenvolver estratégias de controle adequadas ao cenário atual dos sistemas de potência, com grande presença de fontes de distorção harmônica e afundamento de tensão. Além disso, verifica-se que instalações com alto conteúdo harmônico, como o forno a arco, requerem equipamentos e técnicas capazes de melhorar o perfil de tensão e reduzir distorções harmônicas. Adicionalmente, percebe-se uma forte tendência à inclusão de fontes de energia renovável no sistema, sob forma de GD. Conforme visto, a conexão destas fontes compromete a qualidade de energia.

Portanto, a partir desta revisão, concluiu-se que este cenário cria um ambiente propício para a aplicação de CER controlado por redes neurais artificiais, pois estas são capazes de se adaptar às diversas condições de operação. Esta capacidade e o poder de generalização das RNA's confere inteligência ao controle, contribuindo, dessa forma, tanto para novas instalações quanto para sistemas já existentes.

Capítulo III

Metodologia Proposta

III.1 Introdução

A metodologia proposta de conferir inteligência ao CER se destina a promover um rígido controle de tensão e, ao mesmo tempo, impedir que a distorção harmônica ultrapasse valores toleráveis em determinada barra de um sistema elétrico de potência, seja ele de distribuição contendo *Microgrids* ou de transmissão e subtransmissão com grandes fontes harmônicas como fornos a arco. Para tanto, serão desenvolvidas estratégias de controle inteligente para utilização em compensador estático de reativos (CER), composto de reator controlado por tiristor (RCT) e bancos de capacitores chaveados, em série com indutores, formando filtros harmônicos. Dessa forma, o CER proposto promove o controle de tensão e a redução da distorção harmônica de acordo com as potências reativas do RCT e dos filtros, determinadas, respectivamente, pelo ângulo de disparo dos tiristores e o número de filtros chaveados.

A determinação dos filtros a serem ligados ou desligados e do ângulo de disparo do RCT é feita por duas redes neurais artificiais (RNA), treinadas para a escolha da estratégia mais adequada de controle. Neste trabalho, é contemplado o controle simultâneo de tensão na frequência fundamental e harmônicos para operação em regime permanente. Vale ressaltar que os desequilíbrios, faltas e fenômenos transitórios não são abordados, sendo, portanto, temas a serem desenvolvidos em trabalhos futuros.

No presente trabalho, os sistemas e seus dispositivos são modelados através da ferramenta computacional para cálculo do fluxo de potência pelo método de injeção de

correntes trifásico harmônico (MICTH), com recursos da ferramenta computacional MatLab®.

III.2 Método de injeção de correntes trifásico harmônico (MICTH)

A metodologia empregada para o cálculo do fluxo de potência harmônico é baseada nas equações de injeção de correntes (VARIZ, 2006), denominado Método de Injeção de Correntes Trifásico Harmônico (MICTH). A sua formulação é integralmente no domínio da frequência com solução iterativa baseada no método Newton-Raphson. O MICTH constitui uma ferramenta de análise harmônica eficiente, robusta e precisa, que permite a simulação da rede completa, ao representar todas as características dos componentes do sistema.

O sistema matricial base utilizado é apresentado em (1). Essa matriz é formada por H subsistemas, onde H é o número total de frequências simuladas.

$$\begin{bmatrix} [\Delta I^{abc}]_0 \\ [\Delta I^{abc}]_1 \\ [\Delta I^{abc}]_2 \\ \vdots \\ [\Delta I^{abc}]_H \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} [J^{abc}]_{00} & [J^{abc}]_{01} & [J^{abc}]_{02} & \dots & [J^{abc}]_{0H} \\ [J^{abc}]_{10} & [J^{abc}]_{11} & [J^{abc}]_{12} & \dots & [J^{abc}]_{1H} \\ [J^{abc}]_{20} & [J^{abc}]_{21} & [J^{abc}]_{22} & \dots & [J^{abc}]_{2H} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [J^{abc}]_{H0} & [J^{abc}]_{H1} & [J^{abc}]_{H2} & \dots & [J^{abc}]_{HH} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [\Delta V^{abc}]_0 \\ [\Delta V^{abc}]_1 \\ [\Delta V^{abc}]_2 \\ \vdots \\ [\Delta V^{abc}]_H \end{bmatrix} \quad (1)$$

onde:

$[\Delta I_k^{abc}]_h$ é o vetor com os resíduos de corrente da barra k na frequência harmônica h ;

$[J_{ki}^{abc}]_{hh}$ é o bloco ki trifásico complexo da matriz Jacobiana no subsistema de frequência harmônica h ;

$[J_{ki}^{abc}]_{hn}$ é o bloco ki trifásico complexo da matriz Jacobiana representando os acoplamentos harmônicos entre as frequências harmônicas h e n , devido as não-linearidades do sistema;

$\left[\Delta V_k^{abc} \right]_h$ é o vetor trifásico complexo com os incrementos de tensão nodal da barra k na frequência harmônica h .

Cada um dos blocos presentes na matriz Jacobiana é formado pelas contribuições cumulativas de cada um dos elementos do sistema (como cargas, linhas de transmissão, transformadores, etc.) que são obtidas através das derivadas parciais das injeções de corrente de cada um destes elementos em relação às tensões nodais em todas as frequências simuladas. O sistema matricial é, então, formado por componentes trifásicos e complexos, conforme ilustrado em (2) pela expansão do vetor de resíduos na frequência h , onde os subíndices r e m denotam os componentes real e imaginário, respectivamente.

$$\left[\Delta I^{abc} \right]_h = \begin{bmatrix} \left[\Delta I_1^{abc} \right] \\ \left[\Delta I_2^{abc} \right] \\ \vdots \\ \left[\Delta I_{Nb}^{abc} \right] \end{bmatrix}_h = \begin{bmatrix} \left[\left[\Delta I_m^{abc} \right] \right] \\ \left[\left[\Delta I_r^{abc} \right] \right] \end{bmatrix}_1 \\ \left[\left[\Delta I_m^{abc} \right] \right] \\ \left[\left[\Delta I_r^{abc} \right] \right] \end{bmatrix}_2 \\ \vdots \\ \left[\left[\Delta I_m^{abc} \right] \right] \\ \left[\left[\Delta I_r^{abc} \right] \right] \end{bmatrix}_{Nb} \Big|_h = \begin{bmatrix} \left[\left[\begin{matrix} \Delta I_m^a \\ \Delta I_m^b \\ \Delta I_m^c \end{matrix} \right] \right] \\ \left[\left[\begin{matrix} \Delta I_r^a \\ \Delta I_r^b \\ \Delta I_r^c \end{matrix} \right] \right] \end{bmatrix}_1 \\ \left[\left[\begin{matrix} \Delta I_m^a \\ \Delta I_m^b \\ \Delta I_m^c \end{matrix} \right] \right] \\ \left[\left[\begin{matrix} \Delta I_r^a \\ \Delta I_r^b \\ \Delta I_r^c \end{matrix} \right] \right] \end{bmatrix}_2 \\ \vdots \\ \left[\left[\begin{matrix} \Delta I_m^a \\ \Delta I_m^b \\ \Delta I_m^c \end{matrix} \right] \right] \\ \left[\left[\begin{matrix} \Delta I_r^a \\ \Delta I_r^b \\ \Delta I_r^c \end{matrix} \right] \right] \end{bmatrix}_h \quad (2)$$

O agrupamento de todos os subsistemas matriciais em um sistema unificado possibilita a incorporação das contribuições dos acoplamentos harmônicos diretamente na solução iterativa. Estas contribuições se encontram nos blocos fora da diagonal principal da matriz Jacobiana. Em (VARIZ, 2006) encontra-se a descrição detalhada do método, comprovadamente robusto tanto para sistemas de transmissão (malhados), quanto para redes de distribuição (radiais) (VARIZ *et al.*, 2006, 2009; NIQUINI *et al.*, 2008; NIQUINI, 2009). Além disso, o MICTH permite uma modelagem de cargas não-lineares, representando os acoplamentos harmônicos, bem como a inclusão de

equipamentos de eletrônica de potência como retificadores, inversores e dispositivos FACTS.

III.2.1 Modelagem do Compensador Estático de Reativos (CER) com Filtros Harmônicos

O CER utilizado é uma adaptação do modelo do tipo capacitor chaveado mecanicamente com reator controlado por tiristor ou *Mechanically Switched Capacitor - Thyristor-Controlled Reactor* (MSC-TCR), representado na Figura 1. Observa-se que, em série com os capacitores, são inseridos indutores, a fim de que o conjunto atue como filtro harmônico.

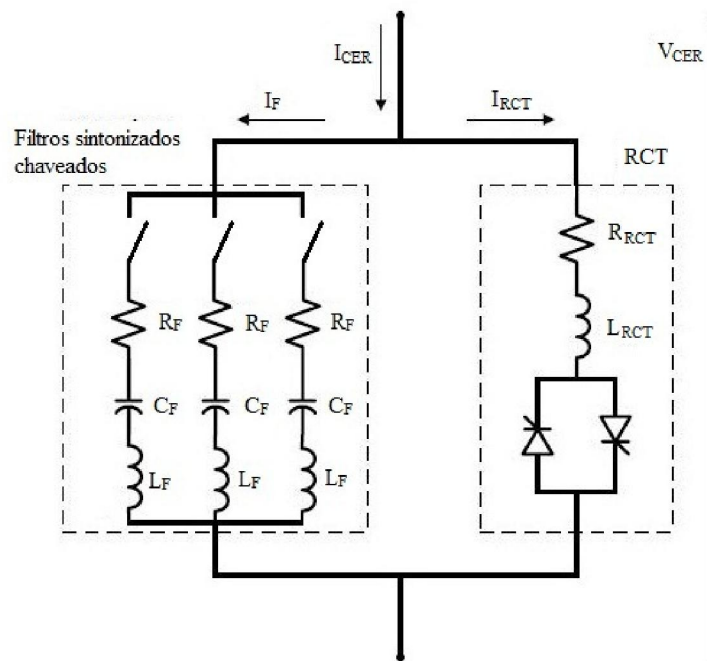


Figura 1 - Modelo do CER

onde:

I_{CER}	Corrente no CER
I_F	Parcela de corrente que passa pelos filtros
I_{RCT}	Parcela de corrente que passa pelo RCT
V_{CER}	Tensão nos terminais do CER
R_F	Resistência dos filtros
C_F	Capacitância dos filtros

L_F	Indutância dos filtros
R_{RCT}	Resistência do RCT
L_{RCT}	Indutância do RCT

Como se pode observar, o dispositivo é composto de um RCT e filtros harmônicos conectados em paralelo. Do ponto de vista operacional, o CER se comporta como uma reatância variável, injetando ou absorvendo potência reativa, sendo um equipamento muito utilizado em sistemas elétricos de potência por permitir uma resposta rápida no controle de reativos (VARIZ, 2006). Os indutores presentes no RCT, bem como os bancos de capacitores podem ser conectados em Y ou Δ . Neste trabalho, em todas as simulações, o RCT encontra-se conectado em Δ e os filtros em Y aterrado.

O CER proposto é conectado em um ponto de fronteira entre o sistema elétrico de potência e um subsistema de interesse onde se encontram não-linearidades. Esse ponto é denominado ponto de conexão comum (PCC). Portanto, a tensão na frequência fundamental (V_{PCC}) e a distorção harmônica total (DHT) da tensão no PCC são os parâmetros utilizados para a avaliação do desempenho do CER proposto. Além disso, as entradas e saídas das redes neurais são obtidas a partir de V_{PCC} , como será explicado posteriormente. O modelo do sistema com o CER proposto é mostrado na figura a seguir:

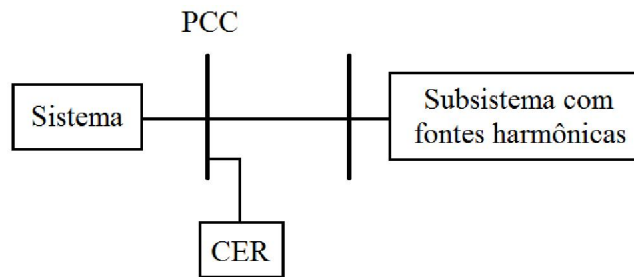


Figura 2 - Modelo do sistema com o CER

A determinação das dimensões do CER é feita a partir do estudo das condições de maior e menor carregamento, como será explicado adiante. Ademais, vale ressaltar que este trabalho de dimensionamento é limitado à determinação das potências reativas necessárias para o controle proposto. Outros estudos necessários para o dimensionamento completo do CER não são contemplados neste trabalho.

III.2.1.1 Reator Controlado por Tiristor (RCT)

No presente trabalho, o modelo do RCT é formado por uma resistência em série com uma indutância conectada a dois tiristores antiparalelos, como pode ser observado na Figura 3.

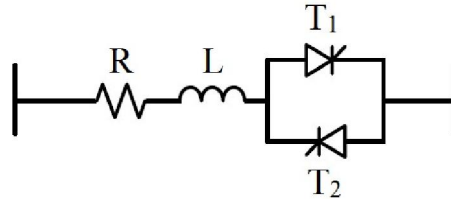


Figura 3 - Modelo do RCT

Em modelos convencionais as perdas de potência ativa são desprezadas para simplificação dos cálculos. No entanto, o modelo proposto considera as perdas, através da resistência conectada em série. Sendo assim, a precisão do modelo aumenta, bem como sua complexidade matemática.

As características de corrente e tensão do RCT em regime permanente são ilustradas na Figura 4.

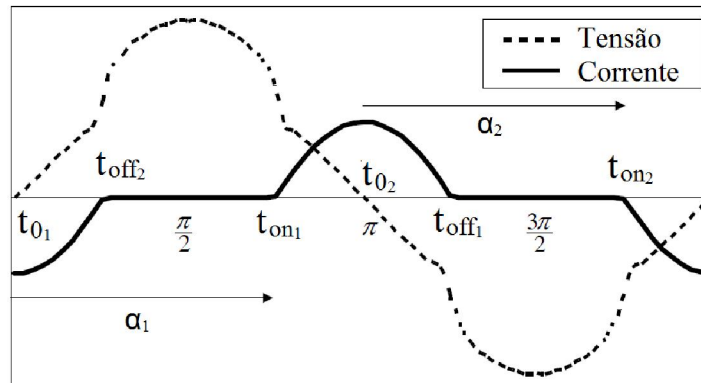


Figura 4 - Corrente e tensão no RCT em regime permanente

Note que o RCT possui condução não-contínua de corrente definida pelos instantes de condução t_{on1} e t_{on2} . Esses instantes de condução são determinados pelos ângulos dos sinais de disparo α_1 e α_2 , dos tiristores T_1 e T_2 , respectivamente. Esses ângulos têm como referência o instante de passagem da tensão por zero ($t = t_0$). Os instantes de corte t_{off1} e t_{off2} correspondem aos instantes de final de condução dos

tiristores. Vale ressaltar que o disparo do RCT pode ocorrer somente quando a polaridade nos terminais dos tiristores for positiva.

Sendo assim, o valor de t_{onk} de um tiristor "k" pode ser calculado conforme a seguinte expressão:

$$t_{onk} = t_{0k} + \frac{\alpha_k}{\omega} \quad (3)$$

onde:

- t_{onk} é o instante de condução do tiristor k (em s);
- t_{0k} é instante inicial para o tiristor k (em s);
- α_k é ângulo de disparo do tiristor k (em rad);
- ω é a frequência angular (em rad/s).

Portanto, o RCT apresenta quatro estados por ciclo, sendo dois estados de condução e dois estados de não-condução. Durante os estados de condução, a corrente $i_c(t)$ no RCT é obtida através da solução da seguinte equação diferencial:

$$L \frac{di_c(t)}{dt} + Ri_c(t) = v_{RCT}(t) \quad (4)$$

Sendo assim, a corrente no RCT, expressa no domínio da frequência é dada por (5) e (6), conforme a dedução encontrada em (VARIZ, 2006).

$$I_{r_i} = \frac{2}{T} \left[\int_{t_{on1}}^{t_{off1}} i_c(t) \cos(h\omega t) dt + \int_{t_{on2}}^{t_{off2}} i_c(t) \cos(h\omega t) dt \right] \quad (5)$$

$$I_{m_h} = \frac{2}{T} \left[\int_{t_{on1}}^{t_{off1}} i_c(t) \text{sen}(h\omega t) dt + \int_{t_{on2}}^{t_{off2}} i_c(t) \text{sen}(h\omega t) dt \right] \quad (6)$$

onde:

- I_{r_h} é a parte real da corrente nos estados de condução;
- I_{m_h} é a parte imaginária da corrente nos estados de condução;
- h é a ordem harmônica;

Observa-se que a potência reativa absorvida pelo indutor pode ser controlada a partir dos ângulos de disparo dos tiristores. Sendo assim, o RCT pode ser utilizado no controle de potência reativa indutiva e, portanto, controlar a tensão.

É importante ressaltar que, por se tratar de um dispositivo de chaveamento, o RCT é uma fonte de harmônicas, inclusive dependente do conteúdo harmônico (espectro de tensão) do barramento onde está conectado. A modelagem detalhada do RCT encontra-se em (VARIZ, 2006).

III.2.1.2 Filtros harmônicos

No modelo proposto, o banco de capacitores que compõe o CER é adaptado para função adicional de filtragem harmônica. Sendo assim, o equipamento atua tanto no suporte de reativos quanto na redução da distorção harmônica da tensão. No presente trabalho, os filtros harmônicos são do tipo passivo sintonizado conforme mostrado na Figura 5.

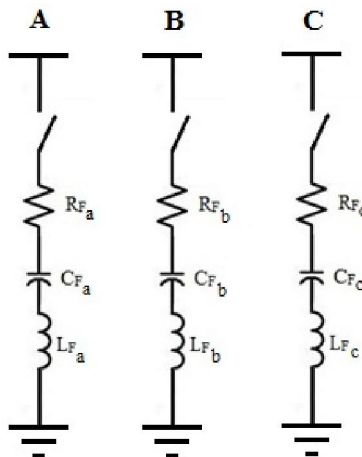


Figura 5 - Modelo de filtro harmônico utilizado

Os filtros passivos sintonizados apresentam uma impedância dependente da frequência. Na frequência de ressonância, isto é, a frequência de sintonia, que se deseja eliminar, as reatâncias indutivas e capacitivas se anulam, e a impedância é igual à resistência do filtro. Considerando-se um filtro ideal, com resistência nula, a impedância na frequência de ressonância (f_r) é, portanto, nula. Entretanto, para frequências mais baixas, o filtro tem comportamento predominantemente capacitivo e, para frequências mais altas, indutivo. Esse comportamento pode ser observado nas figuras e equações a seguir.

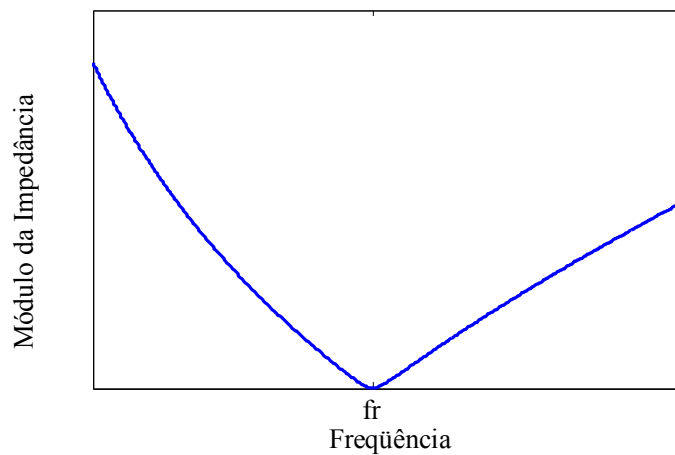


Figura 6 - Módulo da impedância de um filtro LC passivo

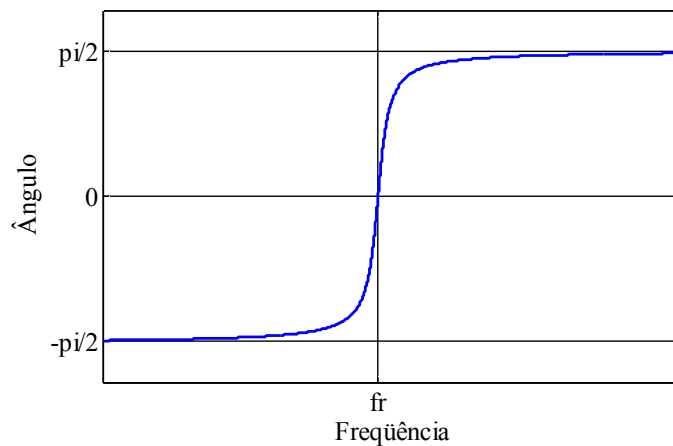


Figura 7 - Ângulo da impedância de um filtro LC passivo

onde a impedância do filtro na forma polar é dada por:

$$Z_F = |Z_F| \angle \theta \quad (7)$$

$$|Z_F| = \sqrt{R_F^2 + (X_{L_F} - X_{C_F})^2} \quad (8)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{(X_{L_F} - X_{C_F})}{R_F}\right) \quad (9)$$

onde:

Z_F	é a impedância do filtro;
R_F	é a resistência do filtro;
X_{L_F}	é a reatância indutiva do filtro;
X_{C_F}	é a reatância capacitiva do filtro;
$ Z_F $	é o módulo da impedância na forma polar;
θ	é o ângulo da impedância na forma polar.

Observando os gráficos e equações é possível notar que um filtro sintonizado para uma dada frequência, atua como um curto-circuito para esta frequência, enquanto apresenta comportamento capacitivo nas frequências menores que a de sintonia. Por essa razão, o CER proposto tem filtros dessa natureza, de forma que possam promover o suporte de reativos, como bancos de capacitores na frequência fundamental e, ao mesmo tempo, filtrar componentes harmônicas que se deseja eliminar.

Entretanto, para que os filtros, que são constituídos de indutores e capacitores, possam ser utilizados conforme proposto, é necessário avaliar o impacto causado pelo chaveamento dos mesmos. O chaveamento de bancos de capacitores provoca efeitos transitórios no sistema, reduzindo a vida útil do próprio capacitor e dos demais equipamentos elétricos presentes, além de comprometer a qualidade de energia (SHU-TING TSENG *et al.*, 2011). Algumas técnicas para a redução dos efeitos transitórios devidos à atuação de bancos de capacitores chaveados são: (i) o chaveamento sequencial (ABDULSALAM e XU, 2007); (ii) associação de resistências em série para limitação de sobrecorrentes transitórias e (iii) chaveamento durante a passagem de tensão por zero (SHU-TING TSENG e JIANN-FUH CHEN, 2012). Além disso, a associação de indutores em série com os capacitores promove a redução dos efeitos transitórios do chaveamento dos mesmos (HILDRETH *et al.*, 2007). Por esta razão, a

metodologia proposta se baseia na utilização de CER composto de RCT associado a filtros dessa natureza.

Ademais, na presente dissertação, adota-se a premissa de que os capacitores/filtros são adequados para a operação no sistema onde estão instalados. Além disso, os fenômenos transitórios não são abordados, constituindo, portanto, tema para desenvolvimento futuro. Sendo assim, tendo em vista a existência de métodos para o chaveamento de bancos de capacitores como visto anteriormente, verifica-se que a aplicação da metodologia proposta pode ser viável.

Neste trabalho, a estratégia de controle de tensão e harmônicos do CER ilustrado na figura 2 é feita através de redes neurais artificiais responsáveis pela definição do ângulo de disparo do RCT e os filtros harmônicos a serem ligados e desligados. Tal solução tem como principal vantagem a possibilidade de desempenhar um controle adaptativo, de forma rápida e precisa. Além disso, o controle por redes neurais pode ser implementado em hardware.

III.2.2 Modelagem de cargas não-lineares

A modelagem das cargas não-lineares é feita através da associação de uma carga com potência constante com uma fonte de corrente harmônica, conforme ilustra a Figura 8.

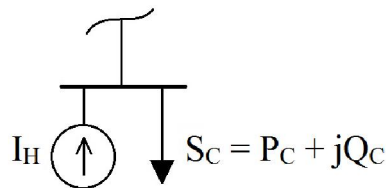


Figura 8 - Modelo de carga não-linear

onde:

- I_H representa as injeções de correntes complexas das fontes de harmônicas;
- S_C é a potência aparente da carga na frequência fundamental;
- P_C é a potência ativa da carga na frequência fundamental;
- Q_C é a potência reativa da carga na frequência fundamental.

O objetivo desta modelagem é representar cargas que variam ao longo do dia, criando cenários para a avaliação da metodologia proposta. Cada cenário exige um ajuste específico de parâmetros do CER proposto, para que o mesmo realize o controle. Para tanto, são acrescentadas variações das potências nas barras e/ou das componentes harmônicas a fim de gerar casos (cenários de carga) distintos. Sendo assim, os valores de potência da carga (S_c) e correntes harmônicas de ordem h ($I_{H_c}^{NL}$) para um dado caso c , devido a cargas não-lineares é definido, respectivamente, pelas equações a seguir:

$$S_c = F_{C_c} S_N + R_c \quad (10)$$

$$I_{H_c}^{NL} = F_{C_c} I_h \quad (11)$$

onde:

- F_{C_c} é o fator de variação da carga para o caso c ;
- S_N é potência nominal da carga;
- R_c é o fator aleatório de variação da carga no caso c ;
- I_h é a amplitude da componente harmônica de ordem h no caso base.

O fator de variação de carga (F_{C_c}) é utilizado para a simulação de cenários com patamares de carregamento distintos, como, por exemplo, uma sucessão de cenários com carga crescente, de 50% a 150% do valor no caso base. Portanto, F_{C_c} seria igual a 0,5 no caso de carga mais leve, aumentando gradualmente até 1,5 no caso de carga mais pesada.

No presente trabalho, os valores das componentes harmônicas (I_h) adotados são baseados no padrão de espectro de corrente encontrado em (MOK *et al.*, 2011). É importante salientar que cada carga tem variações aleatórias distintas. Caso a carga seja linear, apenas a parcela de potência (S_c) é representada.

III.2.2.1 Forno a arco

A representação de carga não-linear para o forno a arco é feita através de um modelo do tipo impedância constante, associada a uma fonte de correntes harmônicas, como mostra a figura a seguir:

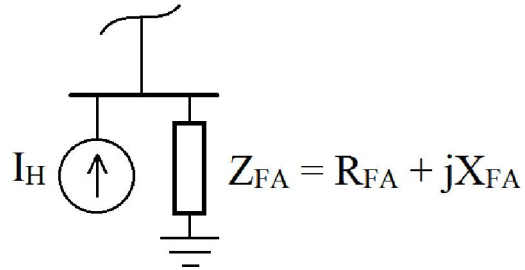


Figura 9 - Modelo de forno a arco

onde:

I_H representa as injeções de correntes complexas devido ao forno a arco;

Z_{FA} é a impedância do forno a arco na frequência fundamental;

R_{FA} é a resistência do forno a arco;

X_{FA} é a reatância indutiva do forno a arco na frequência fundamental.

A modelagem proposta tem como finalidade representar uma impedância que varia de forma imprevisível, porém, dentro de uma faixa limitada de valores. Sendo assim, a impedância do forno a arco varia aleatoriamente na faixa entre 90% e 110% da sua impedância base. A impedância base, por sua vez, é obtida através da potência nominal do forno. O padrão de espectro de amplitude de correntes harmônicas é baseado em (SALOR *et al.*, 2010). Essas características são descritas matematicamente pelas equações a seguir:

$$Z_c = Z_N + R_c \quad (12)$$

$$I_{H_c}^{FA} = F_{C_c} (I_h + R_{h_c}) \quad (13)$$

onde:

- Z_c é a impedância do forno a arco no caso c ;
- Z_N é a impedância do forno operando à potência nominal;
- R_c é o fator aleatório de variação de impedância do forno a arco no caso c ;
- F_{c_c} é o fator de variação da carga para o caso c ;
- $I_{H_c}^{FA}$ é a injeção de corrente harmônica de ordem h , no caso c , devido ao forno a arco;
- I_h é a amplitude da componente harmônica de ordem h no caso base;
- R_{h_c} É o fator aleatório de variação de amplitude da corrente harmônica de ordem h no caso c .

Note que, na frequência fundamental, a potência do forno a arco em função da impedância do mesmo, não segue o padrão de variação do resto do sistema, se mantendo em uma faixa de operação limitada. Além disso, as amplitudes das componentes harmônicas variam aleatoriamente, diferentemente do modelo de carga não-linear na seção anterior. Vale ressaltar que o modelo proposto não leva em consideração as componentes de frequências inter-harmônicas (não-múltiplas da fundamental) nem oscilações de baixa frequência, ou subharmônicas (inferiores à frequência fundamental), presentes em fornos a arco reais.

III.2.3 Modelagem das fontes de GD

As fontes de GD são modeladas como geradores, onde as não-linearidades são representadas através da inclusão de fontes de correntes harmônicas conforme ilustrado na Figura 10.

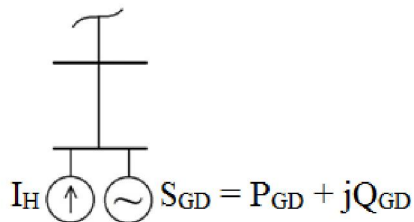


Figura 10 - Modelo de geração distribuída

onde:

- I_H representa a injeção de correntes harmônicas devido à GD;
 S_{GD} é a potência aparente gerada na frequência fundamental;
 P_{GD} é a potência ativa gerada na frequência fundamental;
 Q_{GD} é a potência reativa gerada na frequência fundamental.

Em procedimento análogo ao realizado na modelagem das cargas não-lineares, padrões de espectro de amplitude de corrente em sistemas contendo GD encontrados na literatura (CHEN e SUN, 2011; WANG *et al.*, 2011) são utilizados na representação das fontes de geração distribuída. As equações a seguir descrevem o comportamento da geração e da corrente harmônica de ordem h para um dado cenário c .

$$S_{GD_c} = F_{GD_c} S_N + R_c \quad (14)$$

$$I_{H_c}^{GD} = F_{GD_c} I_h \quad (15)$$

onde:

- S_{GD_c} é a potência gerada no caso c ;
 F_{GD_c} é o fator de variação da geração proveniente da GD no caso c ;
 S_N é a potência nominal da fonte de GD no caso c ;
 R_c é o fator aleatório de geração no caso c ;
 $I_{H_c}^{GD}$ é a corrente harmônica de ordem h injetada pela GD no caso c , devido à GD;
 I_h é a amplitude da componente harmônica de ordem h no caso base.

Devido à natureza imprevisível dos fatores naturais que influenciam na potência gerada por fontes renováveis, esta potência apresenta variações e incertezas. Sendo assim, o modelo incorpora uma componente aleatória na potência ativa gerada, a fim de representar essas incertezas. Todas as componentes harmônicas têm seu módulo acrescido do mesmo fator aleatório da potência, através do multiplicador F_{GD_c} . A modelagem utilizada para a representação de GD é feita tendo em vista a presença de

inversores de frequência entre outros dispositivos geradores de harmônicas nos pontos de conexão das fontes de GD com a rede (JAHDI *et al.*, 2011; ZHE CHEN *et al.*, 2009).

III.3 Redes neurais artificiais

Segundo (HAYKIN, 1998), "uma rede neural é um processador maciçamente paralelamente distribuído constituído de unidades de processamento simples, que têm a propensão natural para armazenar conhecimento experimental e torná-lo disponível para uso". Dessa forma, é possível utilizar uma rede neural artificial (RNA) como ferramenta computacional para diversos fins, devido à sua capacidade de reconhecer padrões de comportamento e de generalização. Os conceitos básicos sobre redes neurais artificiais são descritos no apêndice A.

A construção de uma RNA é feita através da associação entre neurônios artificiais, ou seja, unidades de processamento com funcionamento análogo ao do neurônio biológico. A modelagem matemática dos neurônios artificiais permite o tratamento de dados com relações não-lineares. A Figura 11 ilustra um modelo de neurônio artificial.

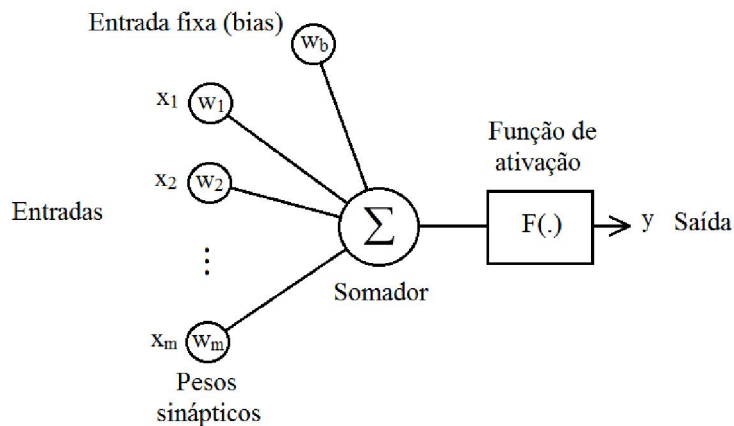


Figura 11 - Neurônio artificial

onde:

- x_m M-ésima variável de entrada no neurônio;
- w_m Peso sináptico da entrada m ;
- $F(.)$ Função de ativação, ou seja, a função determinante do estado de saída do neurônio;
- y Variável de saída do neurônio.

As estruturas possíveis para a RNA, com diferentes tipos de conexão entre neurônios, são diversas. Tais estruturas ou arquiteturas de rede são detalhadamente descritas em (HAYKIN, 1998). Entre os principais tipos de arquitetura, encontra-se a rede direta ou *feed-forward* de múltiplas camadas. Neste tipo de rede, o fluxo de informação caminha em uma só direção, da entrada para a saída, passando por camadas intermediárias conhecidas como camadas ocultas. Em outras palavras, a informação é recebida pela camada de entrada da rede, avança em direção à camada seguinte através da multiplicação do sinal pelos pesos sinápticos, propagando-se, assim, até a saída. A Figura 12 ilustra uma rede *feed-forward*.

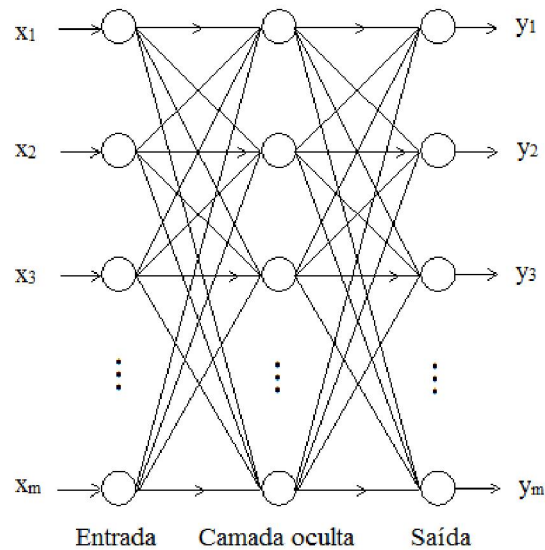


Figura 12 - Rede neural *feed-forward*

onde:

- x_m Variáveis de entrada da rede;
- Y_m Variáveis de saída da rede.

Existem diversos processos de aprendizado para as RNAs, isto é, métodos para o cálculo dos pesos sinápticos a fim de que a rede se torne capaz de desempenhar a função para a qual foi projetada. Esses métodos de aprendizado são extensamente abordados em (HAYKIN, 1998), constando, entre os mesmos, o algoritmo de retro-propagação ou *backpropagation*. Tal algoritmo consiste na exposição de pares de dados de entrada e saída, a fim de minimizar o erro entre a saída obtida pela rede e a desejada. O termo

retro-propagação se refere ao fato de que o ajuste dos pesos sinápticos é realizado em direção contrária à do fluxo de informação.

As redes neurais artificiais com arquitetura e método de treinamento mencionados anteriormente proporcionam um excelente desempenho no reconhecimento de padrões (DE OLIVEIRA, 2005), sendo, portanto, escolhidas para utilização no presente trabalho.

Neste trabalho, são utilizadas duas RNAs conforme mostrado na Figura 13, ambas com uma entrada, uma saída, e uma camada oculta com um número variável de neurônios de acordo com a necessidade do problema. O número de neurônios na camada oculta é definido no processo de treinamento, como será visto na seção III.4.3. A primeira rede neural (RNA_1) tem como função determinar o número de filtros a serem chaveados, de acordo com a tensão na barra onde o CER está conectado, ou ponto de conexão comum (PCC). Sendo assim, a entrada desta RNA é a tensão no PCC (V_{PCC}) e a saída é o número de filtros (NF). A segunda rede neural (RNA_2) determina o ângulo de disparo (α) do RCT, a fim de promover o ajuste fino de tensão no PCC. Para tanto, esta RNA recebe como entrada a diferença entre a tensão pré-regulada (V_{PR}), promovida pelo chaveamento dos filtros determinados pela primeira RNA, e a tensão regulada (V_{REG}) desejada, ou seja, a tensão de referência do CER. A saída é o ângulo de disparo (α) do RCT.

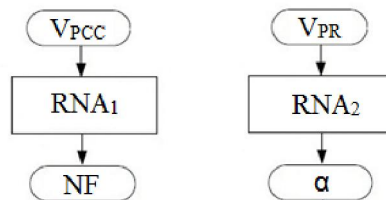


Figura 13 - Fluxograma das redes neurais

III.4 Modelo proposto para a estratégia de controle do CER

A estratégia proposta para a operação do CER é baseada na determinação do suporte de potência reativa necessário para o controle de tensão e dos filtros necessários para a redução da distorção harmônica da tensão. Para tanto, é feita a simulação de cenários distintos de carregamento e geração. As potências reativas indutiva e capacitiva, respectivamente do RCT e dos filtros, na frequência fundamental, devem ser

suficientes para manter a tensão dentro da faixa desejada, em cada cenário, no ponto de conexão comum (PCC), ou seja, o ponto onde se localiza o CER. A partir da simulação de cada cenário, é possível determinar o ângulo de disparo do RCT (α) e o número de filtros (NF) necessários para o controle proposto. Esses valores serão utilizados no treinamento das redes neurais, constituindo a saída desejada, ou seja, a saída conhecida, para o treinamento. As entradas das RNA's são obtidas a partir da tensão em cada cenário, como será explicado adiante.

Por sua vez, o treinamento reúne as entradas e saídas correspondentes em um método de aprendizado supervisionado como visto em III.3. Dessa forma, após treinadas, as RNAs serão capazes de reconhecer o estado da rede e agir de maneira precisa na correção da tensão e da distorção harmônica.

Sendo assim, a metodologia proposta é dividida em 3 passos:

- Avaliação das dimensões do CER;
- Aquisição de dados (cenários);
- Treinamento das redes neurais.

Esse procedimento tem como finalidade a obtenção de um conjunto de duas redes neurais capazes de determinar a configuração correta do CER e dos filtros a serem ligados (ou desligados). E desta forma, permitir que a tensão controlada possa ser mantida dentro da faixa especificada de operação, com distorção harmônica inferior a um limite aceitável.

III.4.1 Avaliação das dimensões do CER

Esta etapa tem como objetivo a obtenção da potência reativa indutiva do RCT necessária para o caso de carga mais leve e a potência reativa capacitiva dos filtros para o caso de carga mais pesada. Em outras palavras, nesta etapa se define o tamanho do CER. Além disso, os valores obtidos neste processo determinam o espaço de busca das redes neurais.

A avaliação das dimensões do CER é feita através da simulação dos casos de menor e maior carregamento do sistema a ser controlado. Para tanto, dois fluxos de potência são calculados, sendo o PCC modelado como uma barra de controle local simples (barra PV). Sendo assim, a potência reativa necessária para os dois casos é encontrada, considerando o nível de tensão desejado.

A partir do cenário de carga mais leve, obtém-se a potência reativa a ser absorvida (Q_{RCT}), ou seja, a capacidade dos indutores do CER. Por outro lado, o cenário de carga mais pesada apresenta o valor da potência reativa a ser injetada (Q_I), conforme ilustrado na figura a seguir:

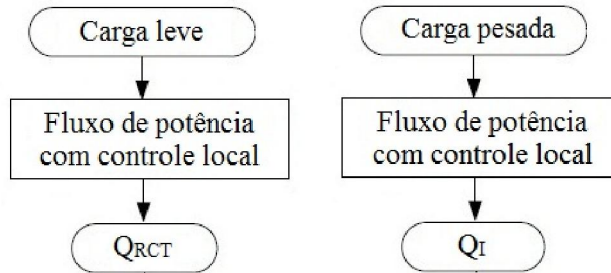


Figura 14 - Fluxos de potência para determinação de Q_I e Q_{RCT}

O número de bancos de capacitores deve ser calculado de forma que cada banco tenha potência reativa menor ou igual à do indutor do CER, para que não haja intervalos de potência reativa onde o RCT não possa atuar. Isto é, a capacidade dos bancos de capacitores deve ser tal que o intervalo de valores de potência reativa resultante seja contínuo em todo o universo de valores desde o mais indutivo (sem filtros e RCT com ângulo 0°) ao mais capacitivo (todos os filtros e RCT com ângulo de 90°). Sendo assim, o número máximo de bancos de capacitores (N_{BC}), de acordo com a potência reativa do RCT é dado por:

$$Q_{BC} \leq Q_{RCT} \quad (16)$$

$$N_{BC} = ARS \left(\frac{Q_I}{Q_{BC}} \right) \quad (17)$$

onde:

Q_{BC} é a potência reativa do banco de capacitores;

Q_{RCT} é a potência reativa do RCT;

Q_I é a potência reativa capacitiva total injetada no caso de carga mais pesada;

$ARS(.)$ é a função de arredondamento para o próximo valor inteiro superior.

O arredondamento para cima é feito para que o número de bancos de capacitores não promova uma potência reativa total inferior à necessária no caso de carga mais pesada.

Levando em conta o fato de que filtros passivos são predominantemente capacitivos na frequência fundamental, como visto em III.2.1, os capacitores são conectados em série com indutores, cuja indutância é calculada para que os conjuntos atuem como filtros, cada um em uma frequência diferente, conforme a equação (18):

$$L_F = \frac{1}{\omega_R^2 C_{BC}} \quad (18)$$

onde:

- L_F é a indutância do indutor do filtro harmônico;
- ω_R é a frequência de ressonância (sintonia) do filtro;
- C_{BC} é a capacitância do banco de capacitores a ser transformado em filtro harmônico.

Importante ressaltar que, neste trabalho, a avaliação das dimensões do CER é limitada à determinação da potência reativa do RCT e dos filtros que o compõem. O dimensionamento completo do CER, ou seja, o projeto do equipamento, leva em conta outros estudos, não contemplados neste trabalho.

III.4.2 Algoritmo de aquisição de dados

Esta etapa tem como principal função a geração de dados (cenários) para o treinamento das redes neurais. Além disso permite avaliar o desempenho do equipamento. Para tal, é elaborado um algoritmo em 6 passos para a simulação de diversos cenários de carregamento, geração distribuída e injeção de harmônicas.

Cada cenário exige um ajuste diferente dos equipamentos, ou seja, um ângulo de disparo dos tiristores do CER e o número de filtros a serem ligados, para que a tensão se mantenha dentro da faixa de operação desejada e que a distorção harmônica não exceda o máximo estipulado. O algoritmo proposto é ilustrado pela Figura 15.

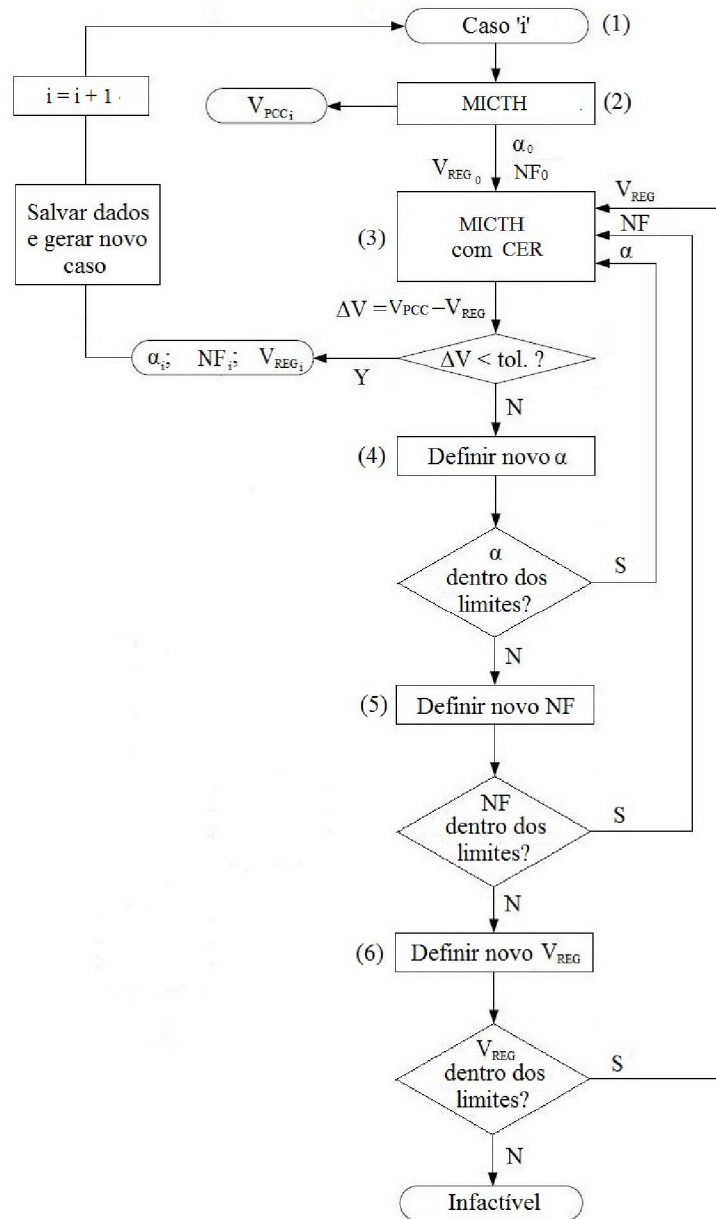


Figura 15 - Algoritmo de aquisição de dados

onde:

V_{REG_0} é a tensão regulada inicial, igual à tensão de referência do CER;

NF_0 é o número de filtros inicial;

α_0 é o ângulo de disparo inicial do RCT;

V_{REG} é a tensão regulada, igual à tensão de referência do CER;

NF é o número de filtros;

- α é o ângulo de disparo do RCT;
- V_{PCC} é a tensão no ponto de conexão comum (PCC).

Os dados de entrada para o MICTH são os dados de carga, geração e injeções de correntes harmônicas. Por sua vez, a saída é a tensão fundamental no PCC (V_{PCC}) e as tensões harmônicas. O objetivo do cálculo do fluxo de potência harmônico é determinar, para cada cenário de carga e geração, incluindo as não-linearidades, a tensão fundamental no PCC correspondente a esse cenário, bem como o DHT da tensão. Esses dados serão utilizados para o ajuste de parâmetros do CER pelas redes neurais, como será explicado em III.5, quando o mesmo estiver em operação. Uma vez que o sistema de controle estiver atuando, a tensão fundamental e as tensões harmônicas no PCC podem ser obtidas através de medidores de qualidade de energia (SHAOMING LI *et al.*, 2010; PARANHOS *et al.*, 2007).

Os passos do algoritmo proposto são descritos a seguir.

- **Passo 1:**

Inicialmente é gerado um caso i com um nível de carregamento e/ou geração descrito pelas equações (10) e (14), respectivamente. Caso o sistema tenha um forno a arco, a impedância do mesmo é dada por (12). As correntes harmônicas injetadas são dadas pela soma das componentes referentes à carga não-linear ($I_{H_w}^{NL}$) e/ou forno a arco ($I_{H_w}^{FA}$) e/ou GD ($I_{H_w}^{GD}$), em cada frequência, descritas nas equações (11), (13) e (15), respectivamente. Esta soma é representada pela equação a seguir:

$$I_{H_w} = I_{H_w}^{NL} + I_{H_w}^{FA} + I_{H_w}^{GD} \quad (19)$$

onde:

- I_{H_w} Injeção de corrente harmônica de ordem h em uma dada barra w com presença de elementos não-lineares no caso i ;
- $I_{H_w}^{NL}$ Injeção de corrente harmônica de ordem h em uma barra w devido à presença de cargas não-lineares no caso i ;

- $I_{H_w}^{FA}$ Injeção de corrente harmônica de ordem h em uma barra w devido à presença de forno a arco no caso i ;
- $I_{H_w}^{GD}$ Injeção de corrente harmônica de ordem h em uma barra w devido à presença de GD no caso i .

Os fatores de variação F_{C_c} e F_{GD_c} nas equações (10) e (11), e (13) a (15) representam o nível de carregamento e geração em cada caso com relação ao carregamento ou geração no caso base, como visto em III.2.2 e III.2.. Essa relação é dada pela razão entre a potência da carga no caso atual e a potência da carga no caso base. Caso exista um forno a arco, o mesmo tem sua impedância variada aleatoriamente numa faixa de 90% a 110% de seu valor base, não seguindo o padrão do resto do sistema, como visto na seção III.2..1.

O valor destes fatores pode ser definido por uma expressão matemática escolhida de acordo com a finalidade do estudo. As expressões para cada estudo de caso serão detalhadas na seção de resultados, mais adiante. A determinação da variação dos fatores F_{C_c} e F_{GD_c} permite representar cenários com certa previsibilidade, porém, ao mesmo tempo, contendo incertezas. Dessa forma, as cargas, a GD ou o forno a arco podem ter o mesmo comportamento das cargas do sistema todo ou ter um comportamento fixo, dependendo da escolha feita para o estudo desejado.

- **Passo 2:**

No segundo passo do algoritmo é calculado o fluxo de potência harmônico sem o controle do CER, para a obtenção da tensão não-regulada no PCC (V_{PCC}) referente ao caso. O valor dessa variável é utilizado como entrada para as redes neurais.

- **Passo 3:**

No passo 3 é iniciado um processo iterativo para o cenário em questão (caso i). Neste passo, são atualizados os valores da tensão regulada ($V_{REG(i)}$), ângulo de disparo do CER (α_i) e número de filtros (NF_i), ou, caso seja a

primeira iteração, são dados valores iniciais para estas variáveis (α_0 , NF_0 e $V_{REG(0)}$). Em seguida é calculado o fluxo de potência harmônico com o controle do CER adotando o novo ângulo de disparo (α) e o número de filtros (NF) atualizados. É, então, verificado o critério de convergência, baseado na diferença entre a tensão calculada e a tensão desejada (ΔV). Se esse desvio for inferior à tolerância pré-estipulada (tol_V e tol_{DHT}), o algoritmo é interrompido e são guardados os valores de α , NF e V_{REG} , caso contrário, o algoritmo prossegue para ajuste dos valores α , NF e V_{REG} .

- **Passo 4:**

O passo 4 faz a verificação dos limites de α_i . Caso a tensão ainda não esteja dentro da faixa aceitável, um novo ângulo é calculado por um processo baseado no método da Bissecção (KIUSALAAS, 2005). Se a tensão for superior ao limite da faixa de tensão regulada, o novo ângulo é menor que o anterior, uma vez que o ângulo de disparo reduzido promove o aumento da parcela de potência reativa indutiva do CER, portanto, tendendo a reduzir a tensão. Analogamente, caso a tensão esteja abaixo do limite inferior de tensão regulada, um ângulo maior é calculado, resultando em uma potência reativa indutiva menor e conseqüentemente, aumento de tensão.

Entretanto, se o ângulo de disparo atingir o seu valor mínimo (igual a zero) ou máximo e, mesmo assim, a tensão ainda estiver, respectivamente, acima ou abaixo dos limites de operação desejados, o número de filtros ligados do CER são alterados conforme apresentado no próximo passo.

- **Passo 5:**

Neste passo, um procedimento análogo é feito para o número de filtros harmônicos ligados (NF), onde o número de filtros é ajustado de forma a alterar o suporte de reativos do CER elevando ou abaixando a tensão, ao mesmo tempo que reduz a distorção harmônica, medida pelos índices DHT_V e DHT_i . Para tanto, o número de filtros pode sofrer um (i) acréscimo para elevar a tensão e/ou reduzir a distorção harmônica, ou um (ii) decréscimo, caso o DHT já esteja reduzido e haja necessidade de se reduzir a tensão. Caso

o número máximo ou mínimo de filtros ligados seja violado, o valor de tensão regulada é ajustado para um novo patamar conforme apresentado no próximo passo.

- **Passo 6:**

Por fim, o valor de V_{REG} é ajustado, permitindo mais folga à operação do CER e dos filtros que já estão nos seus limites. Em seguida, é feita a verificação da faixa de tensão regulada. Caso esteja fora dos limites aceitáveis, o caso é considerado infactível. Esta etapa é a última do processo iterativo para o caso em questão no algoritmo de aquisição de dados.

Uma vez determinados os parâmetros dos equipamentos de controle, a verificação de continuidade do passo 3 resultará em valores finais de α , NF e V_{REG} para o cenário (caso i). Em seguida, é iniciado um novo cenário de operação, retornando, assim, para o passo 1.

III.4.2.1 Avaliação de resultados

Após a conclusão do algoritmo de aquisição de dados, os resultados são analisados através de uma nova série de fluxos de potência harmônicos, considerando os cenários gerados e o controle correspondente. A eficácia do controle é verificada pela faixa factível, isto é, o conjunto de cenários onde o controle foi capaz de manter a tensão regulada e as distorções harmônicas dentro dos limites desejados. Levando em conta essa faixa, decide-se pela adoção do controle tal como está, ou por um novo dimensionamento, com maior ou menor abrangência de casos. Ou seja, após o final do processo, avalia-se o desempenho do CER proposto nas suas funções de controle de tensão e redução de distorção harmônica. Caso não seja capaz de fazê-lo, retorna-se à etapa de dimensionamento e amplia-se o espaço de busca, com RCT e filtros de maior potência reativa, para que o CER possa controlar a tensão em todos os cenários.

III.4.2.2 Função dupla dos filtros harmônicos

A natureza capacitiva dos filtros harmônicos na frequência fundamental, como visto em III.2.1, permite uma abordagem de dupla função, pois (i) os mesmos atuam como capacitores para controle de tensão na frequência fundamental da rede, e (ii) também promovem a redução da distorção harmônica eliminando-se as correntes harmônicas correspondente à frequência de sintonia (ressonância). Portanto, em alguns casos são demandados filtros pela sua propriedade capacitiva, quando há redução na tensão do sistema, ou exigidos pela sua propriedade de eliminar correntes harmônicas em casos com alto DHT.

III.4.2.3 Método da bissecção adaptado

Para a realização dos passos 4, 5 e 6 do algoritmo proposto em III.4.2 é feita uma adaptação do método da bissecção, para aplicação específica no problema estudado neste trabalho. O método da bissecção consiste em um algoritmo destinado a encontrar as raízes de uma função $f(x)$ em um dado intervalo $[x_{\min}, x_{\max}]$ (KIUSALAAS, 2005). Para tanto, é necessário que, neste intervalo, haja apenas uma raiz. O método da bissecção é descrito no Apêndice B.

No caso da aplicação presente para encontrar o valor do ângulo de disparo do CER, a presença de uma única raiz pode ser adotada, pois o mesmo opera em sua região linear (controlada), como visto em III.2.4. Nesse caso, x e o intervalo $[x_{\min}, x_{\max}]$ são substituídos, respectivamente, pelo ângulo de disparo α do RCT e os seus limites $[0^\circ, 90^\circ]$. A função $f(x)$ é substituída pela função $y(\alpha)$, que representa a relação entre o valor de α e o desvio entre a tensão obtida pelo fluxo de potência com o controle do CER ajustado com o ângulo de disparo α e o valor da tensão regulada, ou seja:

$$\Delta V = y(\alpha) \quad (20)$$

Além da utilização do fluxo de potência representando a função entre o desvio de tensão e o ângulo de disparo, outras adaptações são feitas. Ao invés de realizar o produto conforme o método original, a avaliação de proximidade da tensão é feita através do sinal do valor do desvio ΔV . Como o disparo do CER com ângulo menor o torna mais indutivo e, portanto, reduz a tensão e vice-versa, caso ΔV seja maior que

zero, significa que a tensão está acima da esperada e, portanto, o ângulo deve ser reduzido. Da mesma forma, caso ΔV seja menor que zero, significa que a tensão está menor do que o esperado e, portanto, o ângulo deve ser aumentado. Uma vez que a tolerância para o desvio de tensão (tol_V) seja respeitada, o processo é interrompido. O procedimento encontra-se resumido na tabela a seguir:

Tabela 1 – Critério de decisão para o método da bissecção adaptado

Desvio	Situação da tensão	Medida para correção do ângulo
$\Delta V > V + tol_V$	Tensão acima do esperado	Escolher α menor
$\Delta V < V - tol_V$	Tensão abaixo do esperado	Escolher α maior
$ \Delta V < tol_V$	Próxima o suficiente de V_{reg}	Adotar valor atual de α

O valor inicial adotado para α é igual a zero e os próximos valores, tanto maiores como menores são escolhidos a partir da soma do valor atual com a metade do intervalo, de forma que, sucessivamente se aproxime mais do valor exato. A Figura 16 ilustra esse processo.

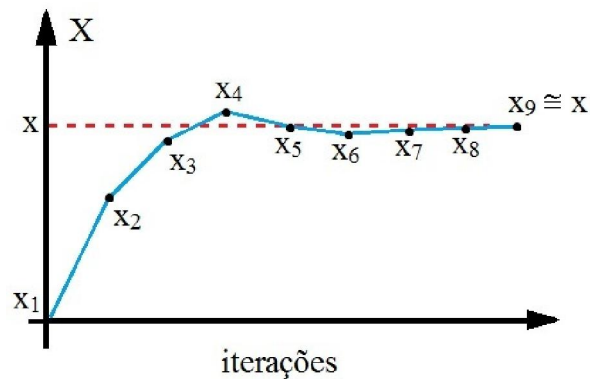


Figura 16 - Método da bissecção adaptado

Essa modificação é feita a fim de que se encontre a decisão com apenas um fluxo de potência por iteração, reduzindo o tempo gasto nas simulações.

III.4.3 Treinamento das redes neurais

Após a aquisição de dados, os mesmos são preparados para formar os conjuntos de entrada e saída das duas redes neurais ilustradas na Figura 13. Conforme mencionado

em III.3, as RNAs têm a arquitetura do tipo *feed-forward*, com algoritmo de treinamento *backpropagation*. Os algoritmos de treinamento das redes neurais RNA₁ e RNA₂ encontram-se representados nas Figuras 17 e 18.

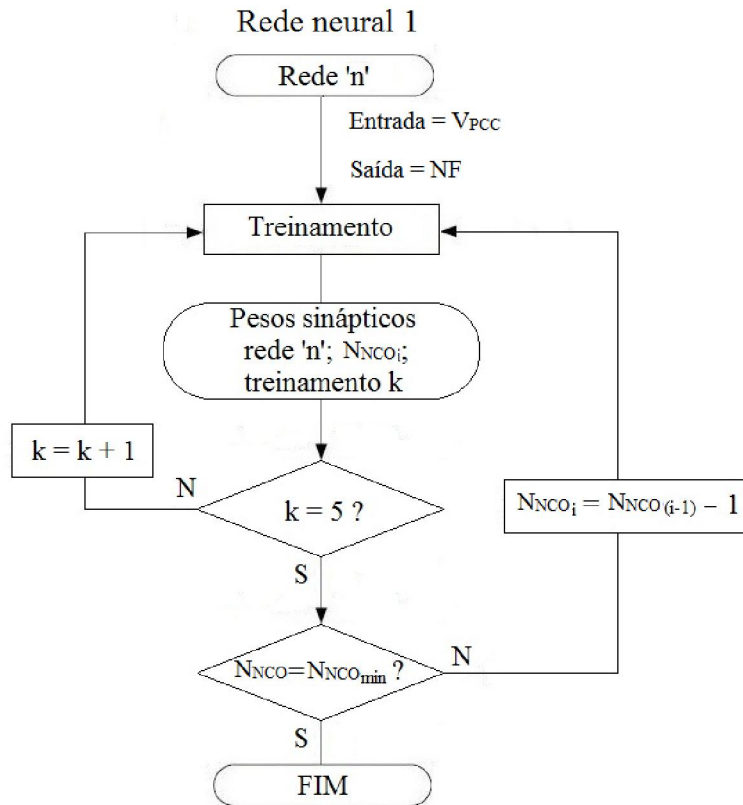


Figura 17 - Algoritmo de treinamento da rede neural 1

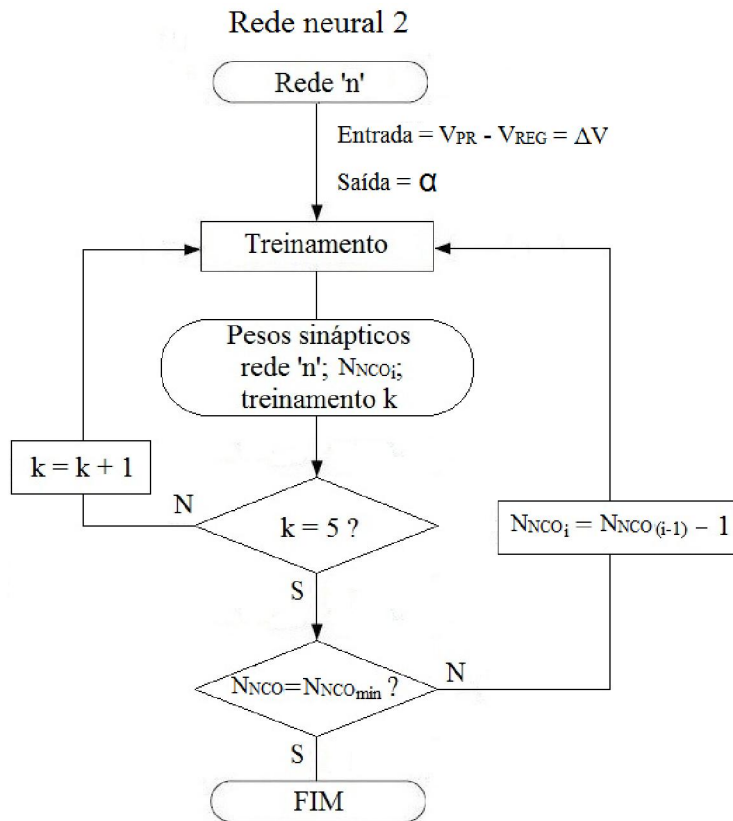


Figura 18 - Algoritmo de treinamento da rede neural 2

onde:

- n é o número da rede em treinamento;
- k é o número do treinamento (de 1 a 5);
- N_{NCO} é o número de neurônios na camada oculta da rede n , no treinamento k ;
- V_{PCC} é a tensão não-regulada (entrada da RNA₁);
- NF é o número de filtros a serem chaveados (saída da RNA₁);
- ΔV é a diferença entre a tensão pré-regulada (V_{PR}) e a tensão regulada desejada (V_{REG}) (entrada da RNA₂);
- α é o ângulo de disparo do RCT (saída da RNA₂).

O algoritmo proposto para a RNA₁ consiste, primeiramente, no fornecimento de dados do sistema, tensão não-regulada no PCC (V_{PCC}) e número de filtros (NF), como entrada e saída desta rede, respectivamente. Destaca-se que estes dados são obtidos de cada cenário simulado na seção III.4.2. Para a RNA₂, o algoritmo proposto utiliza a

diferença entre tensão pré-regulada (V_{PR}) e tensão regulada (V_{REG}) como entrada. Assim, neste caso, é o ângulo de disparo do RCT (α).

Ressalta-se que a tensão pré-regulada (V_{PR}) é a tensão no PCC controlada apenas pelos filtros, ou seja, sem a atuação do RCT. Esta tensão consiste em uma pré-regulagem, ou seja, a um ajuste “grosso”. O RCT promove o ajuste fino de tensão, de acordo com o ângulo de disparo.

A fim de obter o melhor resultado, redes com diferentes arquiteturas, ou seja, com número variável de neurônios na camada oculta (N_{NCO}), são treinadas, tendo em vista que o número de neurônios ideal pode variar de acordo com o sistema. Este número é determinado empiricamente através de tentativas sucessivas (DE OLIVEIRA, 2005). Para tanto, ambas as RNAs iniciam com 20 neurônios na camada oculta, reduzindo gradualmente até 12. Além disso, cada rede é treinada cinco vezes ($k = 1$ a 5) para cada arquitetura. Este procedimento visa avaliar a robustez de cada arquitetura. Após este processo, a rede mais eficiente é, então, escolhida.

Para treinamento e avaliação das RNAs, o universo de dados é dividido em conjuntos de treinamento, validação e teste. Neste trabalho, estes conjuntos são constituídos de 50%, 25% e 25% do universo de dados, respectivamente.

III.5 Operação do sistema com o controle proposto

Uma vez realizado todo o processo de avaliação das dimensões do CER, aquisição de dados e treinamento das redes neurais artificiais, a operação do CER passa a incorporar o controle proposto via RNA (RNA_1 e RNA_2). Dessa forma, a partir da medição das tensões fundamental e harmônicas, a RNA_1 informa os filtros necessários (a serem chaveados) e a RNA_2 fornece os ângulos de disparo para o ajuste fino do CER.

A Figura representa o algoritmo de operação da rede com o CER controlado pelas redes neurais.

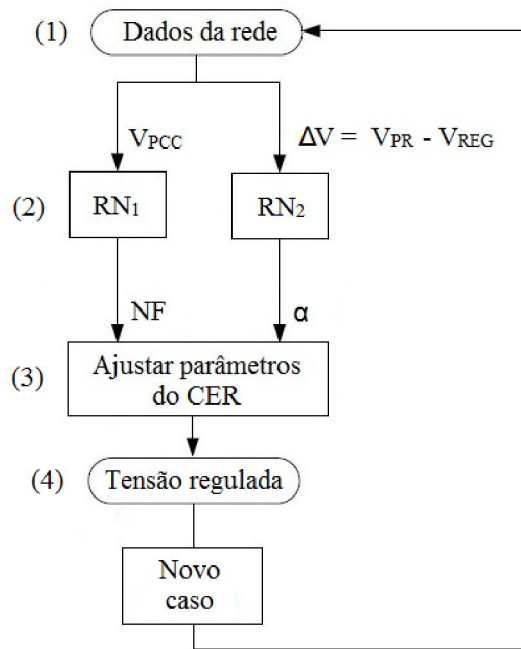


Figura 19 - Algoritmo de operação do sistema.

Os passos do algoritmo de operação com o CER e as redes neurais são descritos a seguir:

- **Passo 1:**

Os dados do sistema podem ser obtidos através do cálculo do fluxo de potência ou pela medição do espectro de tensões para o cenário em questão. Esses dados são as entradas das RNA's, isto é, a tensão não-regulada (V_{PCC}) para a RNA₁ e a diferença (ΔV) entre a tensão pré-regulada (V_{PR}) e a tensão regulada (V_{REG}) para a RNA₂. A tensão pré-regulada é resultante do controle efetuado apenas pelos filtros (sem RCT).

- **Passo 2:**

Este passo realiza a simulação das RNA's a fim prover as variáveis de ajuste do CER. Nesta simulação, a rede neural 1 recebe a tensão não-regulada (V_{PCC}) como entrada e fornece como saída o número de filtros (NF). A rede

neural 2, por sua vez, recebe a diferença (ΔV) como entrada e fornece o ângulo de disparo (α) do RCT como saída.

- **Passo 3:**

O número de filtros (NF) e o ângulo de disparo do RCT(α) obtidos no passo anterior são utilizados no ajuste de parâmetros do CER, de forma que o mesmo seja capaz de regular a tensão e reduzir a distorção harmônica. A ordem de chaveamento dos filtros é determinada após a determinação de NF. Uma vez conhecido este parâmetro e as componentes harmônicas de tensão no PCC, os filtros são chaveados na ordem decrescente das amplitudes destas componentes, a fim de que a maior seja filtrada primeiro, seguida da segunda maior, e assim por diante.

- **Passo 4:**

Após o ajuste de parâmetros, o CER promove o controle necessário para que a tensão e o DHT de tensão no PCC sejam adequados. Este processo pode ser repetido, de forma que, para cada novo cenário de carga, geração e distorção harmônica, as RNAs recebam novos dados de entrada e forneçam as saídas correspondentes. Dessa forma, o controle se torna adaptativo, passando a atuar continuamente.

Vale ressaltar que o processo de treinamento, apesar de demandar um esforço computacional elevado (tempo de processamento), é realizado de forma *offline*, ou seja, constitui-se de uma etapa de preparação prévia à operação. Por outro lado, com RNA₁ e RNA₂ treinadas, as redes operam com baixíssimo esforço computacional, fornecendo resultados praticamente imediatos para uma dada entrada, podendo ser, dessa forma, aplicadas para controle *online*. Além disso, a solução proposta pode ser facilmente encapsulada em hardware (*microchip*) trabalhando de forma autônoma, de acordo com os conceitos emergentes das smart grids (HAMIDI et al., 2010).

Capítulo IV

Resultados

IV. 1 Apresentação dos resultados

A validação da metodologia proposta é feita através da simulação computacional da operação de sistemas-teste com o controle incluído. Tendo em vista o objetivo de verificar a eficácia do controle proposto, as simulações envolvem a geração de casos distintos com diversos níveis de carregamento, operação de fornos a arco, geração distribuída e injeções de correntes harmônicas. Os testes são conduzidos utilizando o fluxo de potência harmônico (MICTH) implementado no *software* MatLab®. As redes neurais artificiais são modeladas com o auxílio do *neural networks toolbox* do MatLab®.

IV.2 Sistema IEEE 14 barras com forno a arco

O sistema IEEE14 barras em sua configuração original é representado na Figura 20. Este é um sistema de transmissão malhado, equilibrado e bastante compensado. A tensão nominal do sistema é igual a 230 kV, potência ativa total igual a 259 MW e reativa 73,5 Mvar no caso base. Os dados do sistema encontram-se no apêndice C.

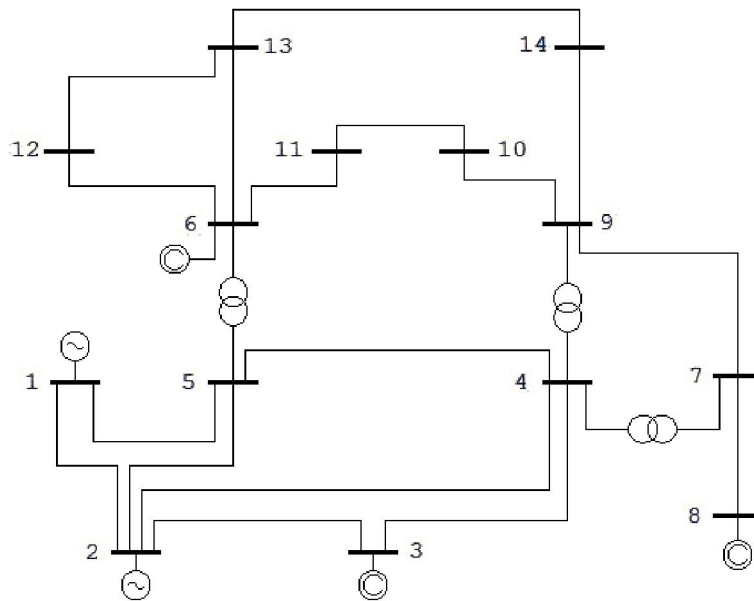


Figura 20 - Sistema IEEE 14 barras original

Para validação da metodologia, são introduzidas modificações neste sistema, como mostra a Figura 21. A linha 9-14 foi retirada e uma carga não-linear representando um forno a arco, conforme o modelo apresentado em III.2. foi incluída na barra 14. A carga original nesta barra foi retirada. Estas modificações foram feitas com a finalidade de representar uma usina siderúrgica contendo um forno a arco alimentada por uma linha dedicada, em uma configuração semelhante à encontrada em (DONSIÓN *et al.*, 2010). Além disso, por se tratar de um sistema bastante compensado, a retirada da linha proporciona, para efeito de estudo, cenários com maior queda de tensão, permitindo uma análise melhor da metodologia.

O forno a arco tem potência nominal de 50 MW (SALOR *et al.*, 2010; DONSIÓN *et al.*, 2010), com fator de potência igual a 0,90 indutivo. A barra 15 é o PCC, onde se encontra o CER composto de um RCT e filtros sintonizados para 5^a e 7^a harmônicas. Além disso, por se tratar de uma instalação que gera harmônicos significativos de ordem par, são incluídos no PCC dois filtros fixos (não chaveados) de 2^a e 4^a harmônicas. O PCC também conta com um transformador Δ -Y aterrada, que proporciona, além de sua função principal, a filtragem de 3^a e 9^a harmônicas (sequência zero) (VARIZ, 2006). Vale ressaltar que o dimensionamento do transformador deve ser feito cuidadosamente, tendo em vista a presença do filtro harmônico de segunda ordem, pois este pode provocar sobretensão mais crítica sobre o transformador. Ademais, o modelo de transformador utilizado não leva em consideração a saturação do núcleo.

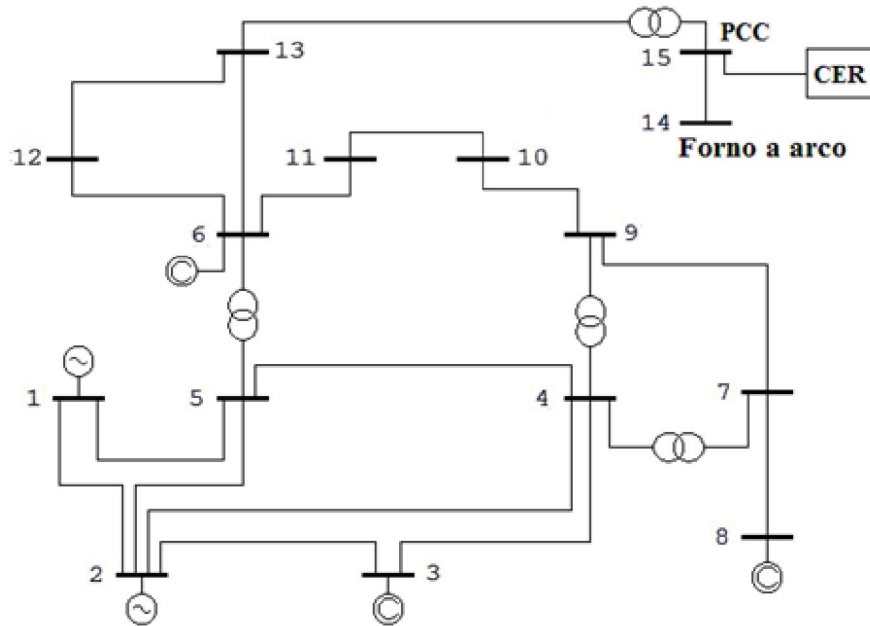


Figura 21 - Sistema IEEE 14 barras modificado

A carga no sistema, a impedância do forno a arco e a injeção de correntes harmônicas em cada caso são descritas, respectivamente, pelas equações (10), (12) e (13), apresentadas em III.4.2 e III.2. 2. 1. O fator de variação de carga para a equação (10) é apresentado pela expressão (21), e o fator de variação para o forno a arco, isto é, para as equações (12) e (13), é igual ao da equação (22).

$$F_{C_k} = 0,5 + 1,5 \left(\frac{c}{N_c} \right) \quad (21)$$

$$F_{C_w} = 1,0 \quad (22)$$

onde:

F_{C_k} Fator de carregamento na barra k;

F_{C_w} Fator de carregamento na barra do forno a arco(w);

c Número do caso;

N_c Número total de casos.

Os carregamentos mínimo e máximo são, respectivamente, iguais a 50% e 200% do caso base. Esse amplo intervalo foi definido propositalmente, devido ao fato de que este sistema é muito bem condicionado, além de contar com suporte de reativos abundante. Sendo assim, mesmo considerando uma carga elevada, a tensão não tem uma queda expressiva. Por sua vez, fôrno o arco é mantido em uma faixa de potência constante, uma vez que o equipamento trabalha de maneira contínua, independentemente do resto do sistema. As componentes harmônicas injetadas pelo fôrno a arco são baseadas nas descritas em (SALOR *et al.*, 2010).

Além disso, para esse estudo, o comportamento dinâmico do fôrno foi desprezado, adotando-se a premissa de que existem controles (como filtro ativo, por exemplo) previamente instalados. Sendo assim, os efeitos transitórios não são contemplados nas análises. Da mesma forma, as oscilações de baixa frequência (da ordem de 2 Hz) decorrentes da variação do comprimento do arco voltaico também foram desconsideradas.

IV.2.1 Avaliação das dimensões do CER

Para a etapa de dimensionamento são calculados dois fluxos de potência harmônicos, com a inclusão do fôrno a arco (carga não-linear) e do CER, sendo um para o caso de carga mais leve e outro para o patamar de carga mais pesada. Os resultados obtidos e as dimensões do CER são apresentados nas tabelas 2 e 3:

Tabela 2 – Carregamento mínimo e máximo do sistema IEEE 14 barras

Carregamento	Tensão no PCC	Potência reativa necessária para regular a tensão
50% (mínimo)	1,010 p.u.	5,76 Mvar Indutiva
200% (máximo)	0,983 p.u.	6,76 Mvar Capacitiva

Tabela 3 – Dados do CER para o sistema IEEE 14 barras

Componente	Potência reativa
Reator controlado por Tiristor (RCT)	6 Mvar Indutiva ($\alpha = 0^\circ$)
Filtro de 5ª Harmônica	3,5 Mvar capacitiva
Filtro de 7ª Harmônica	3,5 Mvar capacitiva

Note que o CER proposto possui potência reativa que varia de 6 Mvar indutivo, com o ângulo de disparo do RCT em 0° e todos os filtros desligados, até 7 Mvar capacitiva, com todos os filtros ligados e o ângulo do RCT igual a 90° . Os filtros são conectados em Y, enquanto os indutores do RCT são conectados em Δ .

IV.2.2 Aquisição de dados

A partir dos parâmetros obtidos na tabela 3, é realizado o processo de aquisição de dados, conforme o algoritmo apresentado na Figura 15 em III.4.2, onde 5000 casos distintos foram simulados.

Devido à grande quantidade de dados, algumas barras de interesse foram escolhidas para a apresentação dos resultados. Além disso, as cargas do sistema tem um padrão de comportamento comum, de forma que a visualização das barras escolhidas permite a visualização do sistema como um todo. Entretanto, o forno a arco tem um padrão diferente de variação. Sendo assim, quatro barras de interesse foram escolhidas para a visualização dos cenários de carga: o forno a arco, a barra do sistema conectada ao PCC, e as barras 3 e 11, respectivamente as barras de maior e menor carga. Portanto, os valores de carregamento para as barras 3, 11 e 13 são mostrados na Figura 22, a fim de representar o comportamento do sistema, enquanto a barra 14 mostra o comportamento do forno a arco.

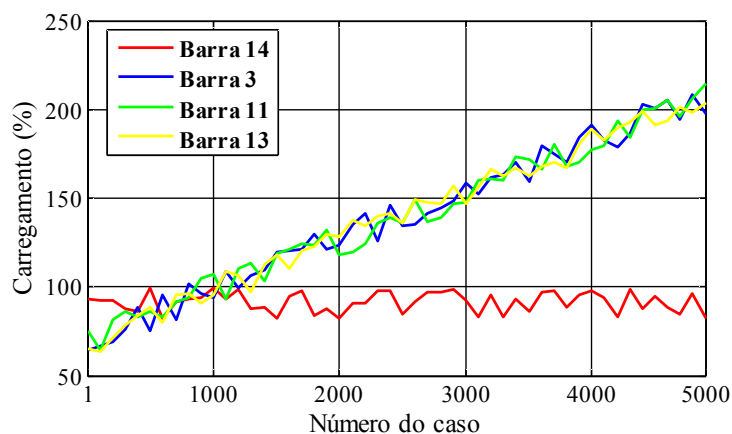


Figura 22 - Carregamento do sistema IEEE 14 barras

A partir dessas simulações, obtém-se o comportamento do sistema sem controle (tensão não-regulada) e com o controle do CER (tensão regulada). A tensão e a distorção harmônica no PCC para cada caso é apresentada nos gráficos a seguir:

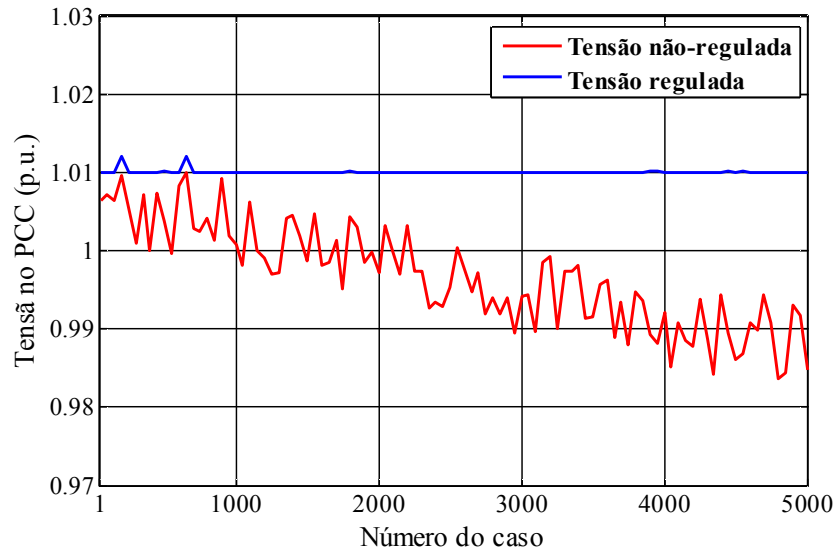


Figura 23 - Perfil de tensão no PCC para o sistema IEEE 14 barras

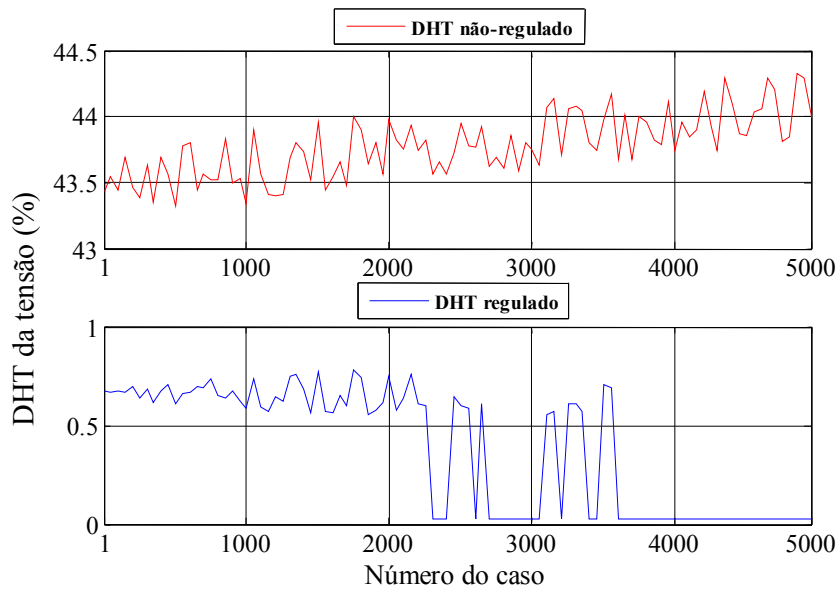


Figura 24 - DHT da tensão no PCC para o sistema IEEE 14 barras

Observando os resultados, percebe-se a eficácia do controle via CER, proporcionando um perfil de tensão com valor regulado e ao mesmo tempo reduzindo consideravelmente o DHT de tensão na barra do PCC.

IV.2.3 Treinamento

Nesta etapa, são utilizados os valores de tensão não-regulada, pré-regulada, número de filtros e ângulo de disparo do CER obtidos no passo anterior. Como demonstrado no algoritmo da Figura 15 em III.4.2, a entrada em cada caso da RNA₁ é a tensão não-regulada e a saída o número de filtros (NF). Por outro lado, para a RNA₂, a entrada e saída são, respectivamente, a tensão pré-regulada (V_{PR}) e o ângulo de disparo (α) do RCT. Após a aplicação do algoritmo de treinamento, obtemos os relatórios de desempenho, como mostram as tabelas 4 e 5:

Tabela 4 – Desempenho da rede neural RNA₁ para o sistema IEEE 14 barras

Rede Neural	Número de neurônios na camada oculta	Acertos na Validação (%)	Acertos no Teste (%)
1	20	99.52	98.72
2	19	99.52	98.88
3	18	96.64	96.64
4	17	99.84	99.52
5	16	96.64	96.80
6	15	99.68	98.88
7	14	99.68	98.88
8	13	99.52	98.72
9	12	99.52	98.88

Tabela 5 – Desempenho da rede neural RNA₂ para o sistema IEEE 14 barras

Rede Neural	Número de neurônios na camada oculta	Acertos – Validação (%)	Acertos – Teste (%)
1	20	92.20	91.40
2	19	92.20	91.00
3	18	85.00	84.40
4	17	90.20	89.20
5	16	85.00	85.80
6	15	90.20	89.00
7	14	85.00	83.80
8	13	83.60	83.40
9	12	76.60	76.00

Como se pode observar, as redes neurais apresentam resultados satisfatórios, com percentuais de acerto acima de 97% para a rede neural RNA₁ e 76% para RNA₂. As melhores configurações apresentam 99,84% e 92,20% de acertos na validação e 99,52% e 91,40% nos testes, respectivamente. Sendo assim, as redes escolhidas para a atuação no controle são as redes 4 para RNA₁ e 1 para RNA₂. É importante ressaltar que, mesmo nos casos onde a RNA₂ não acerta, a tensão regulada apresenta desvios mínimos, pois esses erros representam, em todos os testes realizados, diferenças de ângulo inferiores a 3°. Dessa forma, um percentual de acertos acima de 76% significa que em 76% dos casos não houve desvio angular, enquanto os 24% restantes apresentam variações de 1, 2 ou 3°. Portanto, os valores referentes aos erros podem ser considerados bastante adequados.

IV.2.4 Validação

A validação do método de controle é feita através da simulação de um teste com cenários (casos) não apresentados anteriormente às redes neurais. Nestes casos é avaliada a capacidade de controle do CER através das RNAs obtidas pela metodologia proposta.

O teste é realizado com a geração de 50 casos com um padrão de variação de carregamento em três patamares: carga baixa, média e alta. A injeção de correntes

harmônicas é modelada conforme a equação (13) em III.2.2.1. O carregamento percentual em relação ao caso base nas barras 13 e 14 é ilustrado na Figura 25. Os gráficos a seguir mostram a situação em cada caso.

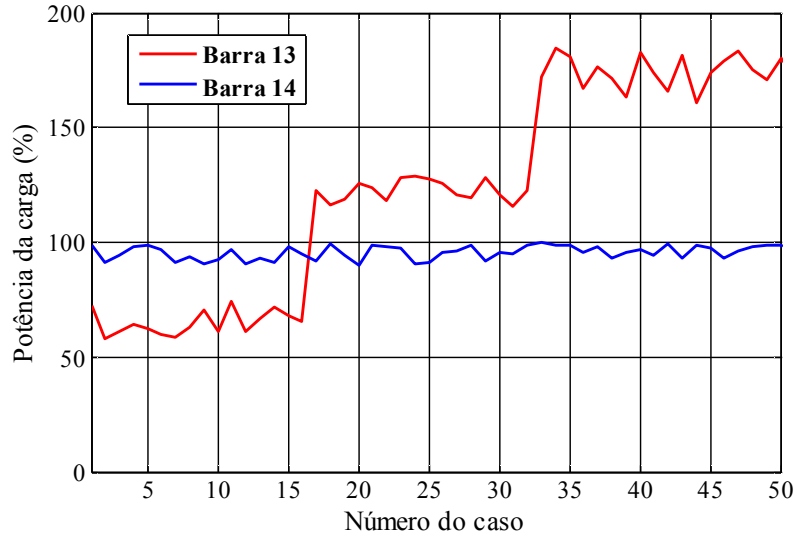


Figura 25 - Perfil de carga - teste - sistema IEEE 14 barras

Para estes cenários, as RNAs determinaram parâmetros para o ajuste da tensão e da distorção harmônica em níveis aceitáveis. O comportamento da tensão e DHT regulados e não-regulados, isto é, com o CER atuando e sem o CER, podem ser visualizados nas figuras 26 e 27. Nota-se que a tensão regulada se mantém dentro de uma faixa especificada de 0,01 p.u. independentemente do patamar de carga, enquanto o DHT se mantém abaixo de 0,8% em todo o intervalo estudado, o que representa uma melhora significativa.

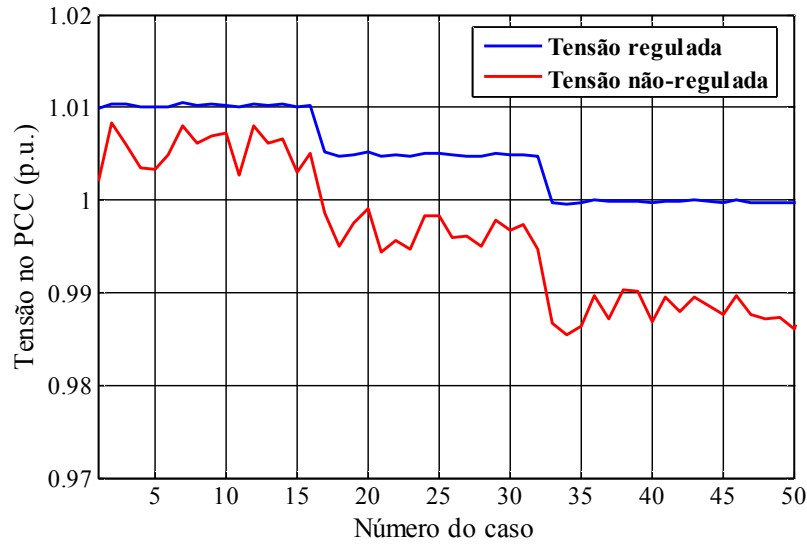


Figura 26 - Perfil de tensão - teste - sistema IEEE 14 barras

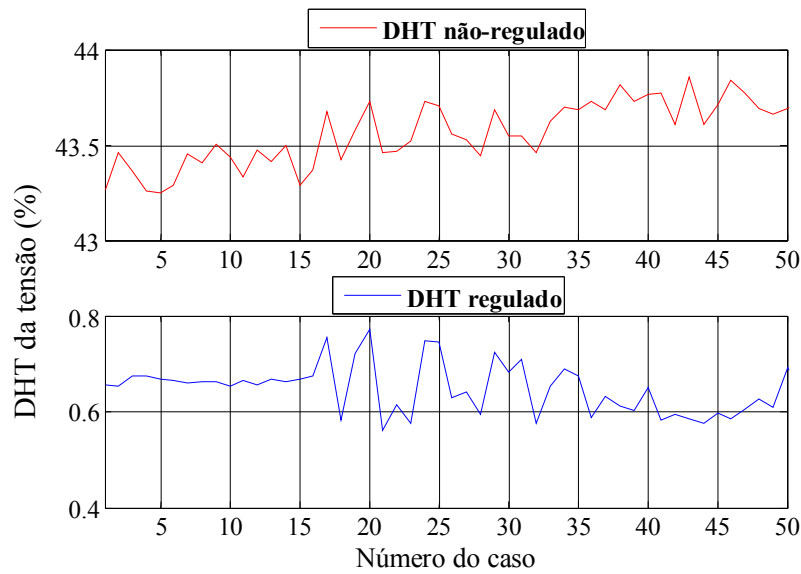


Figura 27 - DHT da tensão - teste - sistema IEEE 14 barras

Observando-se os resultados, é possível notar a eficácia do método na determinação dos parâmetros do CER para o controle de tensão e harmônicos. Os parâmetros do CER determinados pelas RNAs e a tensão para cada caso encontram-se na tabela a seguir:

Tabela 6 – Controle para o teste - sistema IEEE 14 barras

Caso	Número de filtros	Ângulo do CER	Tensão no PCC	Caso	Número de filtros	Ângulo do CER	Tensão no PCC
1	1	23	1.0098	26	1	28	1.0048
2	1	2	1.0104	27	1	27	1.0048
3	1	10	1.0104	28	1	31	1.0047
4	1	18	1.0101	29	1	21	1.0051
5	1	19	1.0101	30	1	24	1.0048
6	1	13	1.0101	31	1	22	1.0049
7	1	4	1.0106	32	1	33	1.0047
8	1	9	1.0101	33	1	53	0.9997
9	1	7	1.0104	34	1	69	0.9996
10	1	5	1.0102	35	1	56	0.9996
11	1	21	1.0100	36	1	35	1.0000
12	1	3	1.0104	37	1	50	0.9998
13	1	9	1.0102	38	1	31	0.9999
14	1	8	1.0103	39	1	32	0.9999
15	1	22	1.0093	40	1	52	0.9998
16	1	13	1.0102	41	1	35	0.9999
17	1	18	1.0052	42	1	44	0.9998
18	1	32	1.0048	43	1	36	1.0000
19	1	21	1.0048	44	1	40	0.9998
20	1	16	1.0052	45	1	45	0.9997
21	1	35	1.0047	46	1	35	1.0000
22	1	29	1.0048	47	1	46	0.9998
23	1	33	1.0047	48	1	49	0.9998
24	1	19	1.0051	49	1	47	0.9997
25	1	19	1.0050	50	1	61	0.9998

A fim de analisar a eficiência da filtragem harmônica, os espectros de tensões e de correntes harmônicas nodais injetadas nas barras do forno a arco, PCC e barras adjacentes (12 e 13), são apresentados nas figuras 28 e 29. Nesse caso, os filtros fixos (2^a e 4^a ordem) não se encontram conectados, para que se possa verificar

exclusivamente o desempenho dos filtros chaveados. O caso número 15 foi escolhido para a análise de resultados por apresentar dados que permitem melhor visualização. Vale ressaltar que o comportamento do sistema nos demais casos é semelhante.

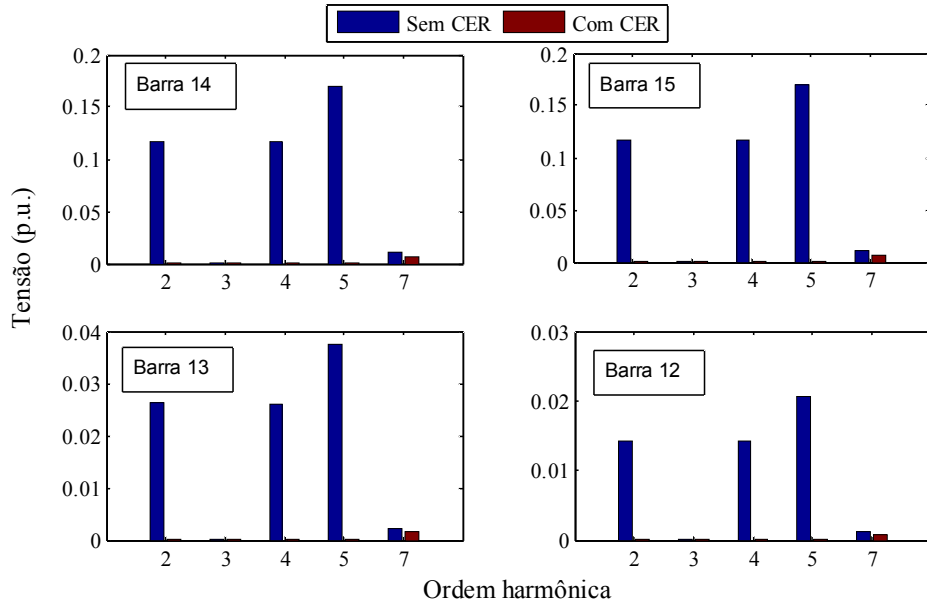


Figura 28 - Espectro de tensão sem filtros fixos

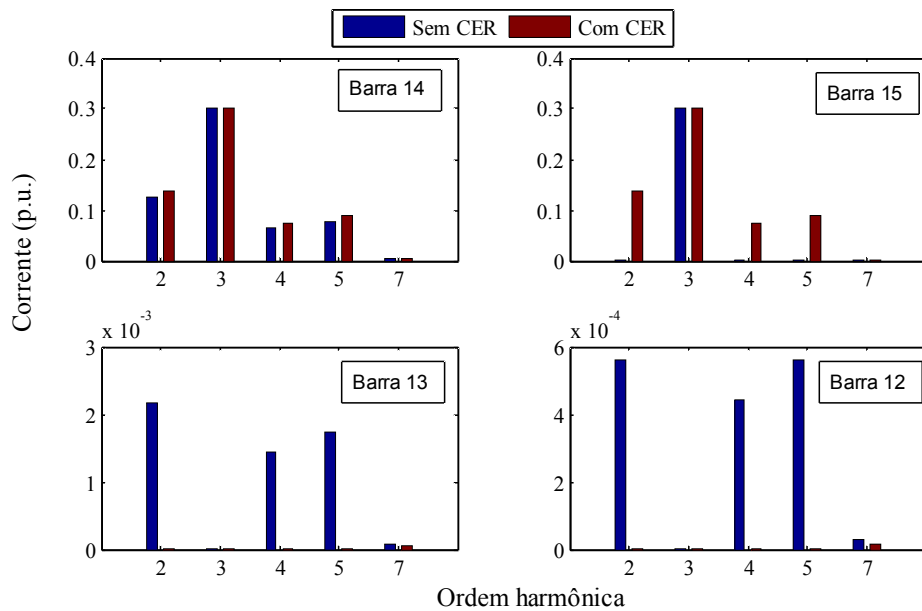


Figura 29 - Espectro de corrente injetada sem filtros fixos

É possível notar que, sem os filtros fixos, as componentes harmônicas de segunda e quarta ordens são elevadas. A seguir, o mesmo caso é estudado, porém com os filtros fixos conectados ao PCC. Verifica-se a redução das componentes citadas, além da atuação do transformador, contribuindo para o resultado final, ilustrado nas figuras a seguir:

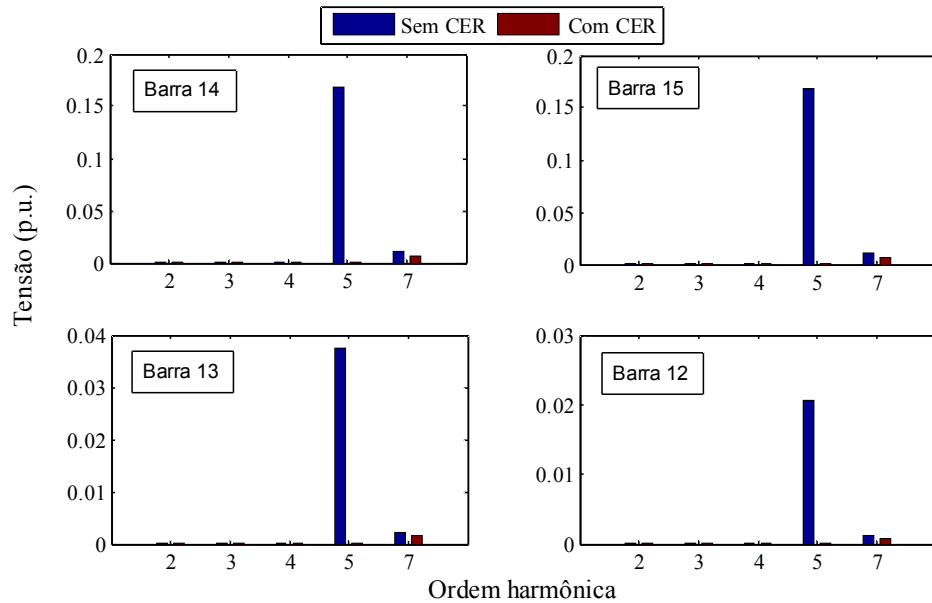


Figura 30 - Espectro de tensão (teste - sistema IEEE 14 barras)

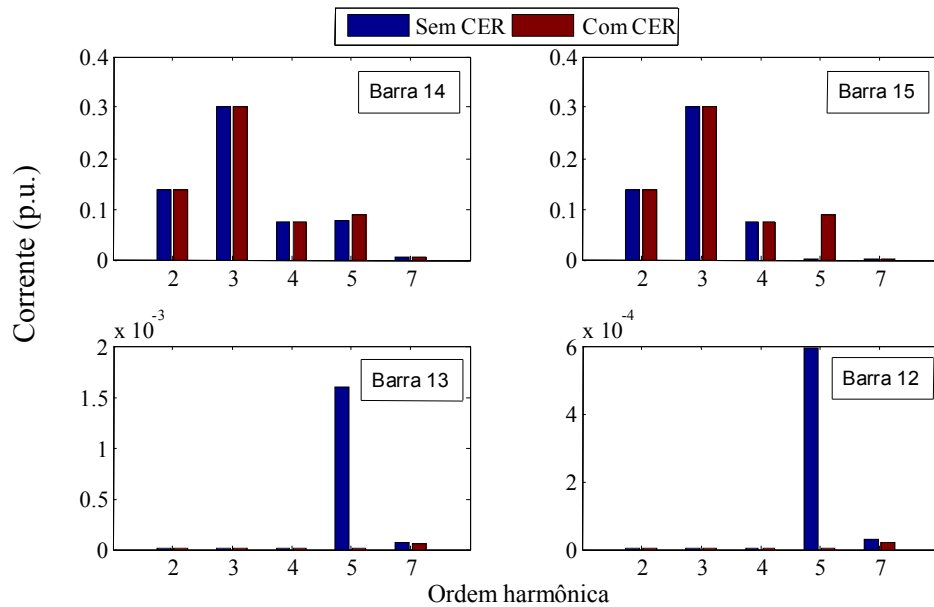


Figura 31 - Espectro de corrente injetada (teste - sistema IEEE 14 barras)

É possível observar que, com o CER, as correntes harmônicas filtradas não se propagam para o sistema externo ao PCC, existindo apenas no subsistema onde se encontra o forno a arco. Além disso, percebe-se que as correntes harmônicas no forno a arco aumentam ligeiramente, devido à atuação do CER. Esse fenômeno é esperado em cargas dessa natureza, como se pode observar em (SALOR *et al.*, 2010). Embora as correntes persistam, as tensões harmônicas no PCC são filtradas, mantendo-se controladas.

Analisando os resultados, é possível notar a eficácia do método na determinação dos parâmetros do CER para o controle de tensão e harmônicos no sistema com forno a arco estudado.

IV.3 Sistema 33 barras

O sistema de distribuição 33 barras (BARAN e WU, 1989) em sua configuração original é representado na Figura 32. Este é um sistema de distribuição radial equilibrado, com tensão nominal igual a 12,66 kV na subestação e potência ativa total igual a 3,715MW e reativa igual a 2,3 Mvar no caso base. Os dados deste sistema encontram-se no apêndice C.

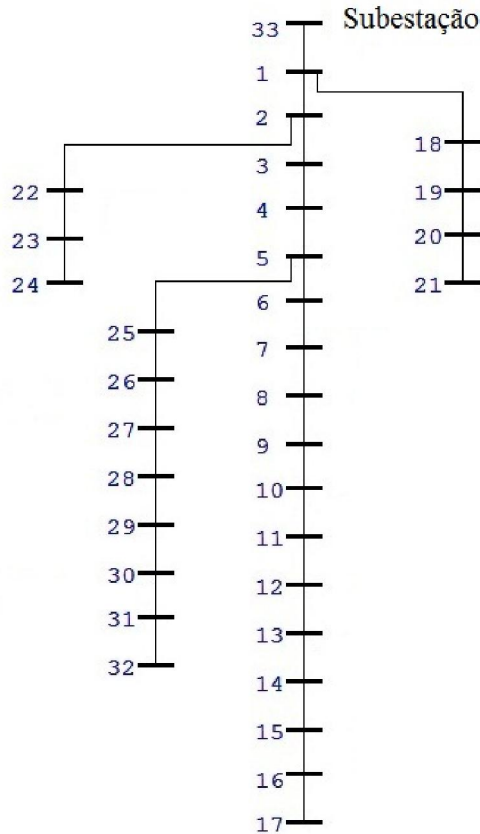


Figura 32 - Sistema 33 barras

Para validação da metodologia, são introduzidas modificações neste sistema, como mostra a Figura 33. As barras 13 a 17 representam uma *microgrid*, sendo o PCC localizado na barra 34. Na *microgrid* encontram-se 3 geradores distribuídos conforme o modelo de GD apresentado em III.2. nas barras extras 35, 36 e 37, e uma carga não-linear, de acordo com o modelo proposto em III.2.2 na barra 17. No PCC se encontra o CER, com três filtros sintonizados para 3^a, 5^a e 7^a harmônicas.

Essas modificações são feitas com a finalidade de representar uma *microgrid*, contendo GD e cargas não-lineares, conectada a um sistema de distribuição existente. A

potência nominal dos geradores é constante, igual a 50 kVA com fator de potência unitário.

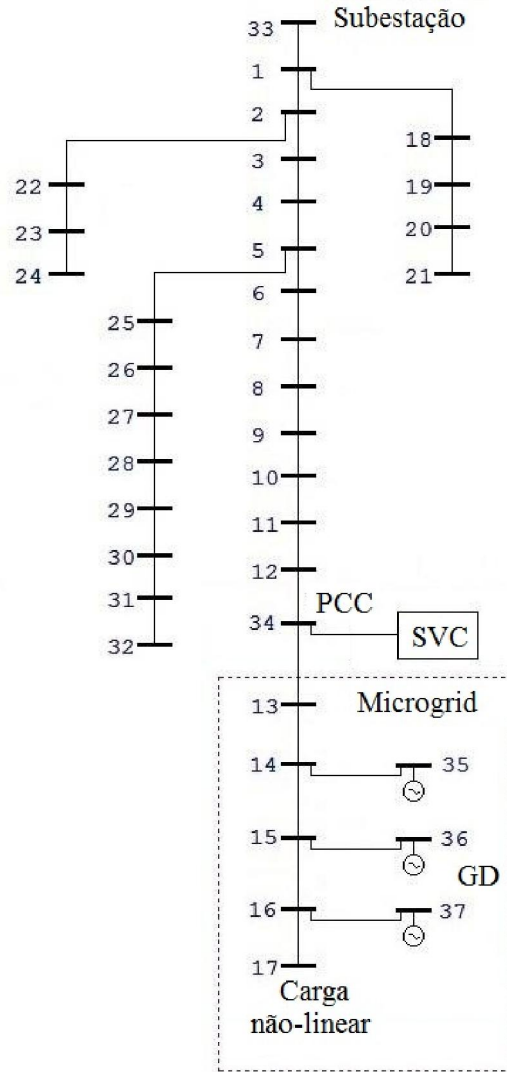


Figura 33 - Sistema 33 barras modificado

A carga no sistema, a geração distribuída e a injeção de correntes harmônicas devido à carga não-linear na barra 17 em cada caso são descritas, respectivamente, pelas equações (10), (12) e (13), apresentadas em III.4.2 e III.2.3. O fator de variação de carga para a equação (10) é apresentado pela expressão (23), e o fator de variação para a carga não-linear e a GD, isto é, para as equações (11) e (14), é igual ao da equação (24):

$$F_{C_k} = 0,4 + 1,2 \left(\frac{c}{N_c} \right) \quad (23)$$

$$F_{GD_w} = 1,0 \quad (24)$$

onde:

- C Número do caso;
- N_c Número total de casos;
- F_{GD_w} Fator de geração em uma barra w ;
- F_{C_w} Fator de carregamento em uma barra k .

Para fins de teste, o valor dos carregamentos mínimo e máximo adotados são, respectivamente, 40% a 160% da carga no caso base. Além disso, as componentes harmônicas, I_{H_w} , adotadas para a injeção de correntes harmônicas devido à carga não-linear na barra 17 são baseadas em (MOK *et al.*, 2011).

IV.3.1 Avaliação das dimensões do CER

Na etapa de avaliação das dimensões do CER, são calculados dois fluxos de potência harmônicos, com a inclusão da carga não-linear, GD e do CER, sendo um para o caso de carga mínima e outro para o patamar de carga máxima. Os resultados obtidos e as dimensões do CER são apresentados nas tabelas a seguir:

Tabela 7 – Carregamento mínimo e máximo do sistema 33 barras

Carregamento	Tensão no PCC	Potência reativa necessária para regular a tensão
40% (mínimo)	0,976 p.u.	799 kvar Indutiva
160% (máximo)	0,887 p.u.	2064 kvar Capacitiva

Tabela 8 – Dados do CER para o sistema 33 barras

Componente	Potência reativa na freq. fundamental
Reator controlado por Tiristor (RCT)	800 kvar Indutiva ($\alpha = 0^\circ$)
Filtro de 3ª Harmônica	700 kvar capacitiva
Filtro de 5ª Harmônica	700 kvar capacitiva
Filtro de 7ª Harmônica	700 kvar capacitiva

Note que o CER proposto possui potência reativa que varia de 800 kvar indutivo, com o ângulo de disparo do RCT em 0° e todos os filtros desligados, a 2100 kvar capacitiva com, todos os filtros ligados e o ângulo do RCT em 90° . Lembrando que os filtros são conectados em Y, enquanto os indutores do RCT são conectados em Δ .

IV.3.2 Aquisição de dados

A partir dos dados obtidos na tabela 8, é realizado o processo de aquisição de dados, conforme o algoritmo apresentado na Figura 15 em III.4.2, onde 3000 casos são simulados.

Em procedimento análogo ao da seção IV.2.2, algumas barras de interesse foram escolhidas para a visualização do carregamento do sistema. Vale ressaltar que as cargas do sistema apresentam um comportamento comum. Portanto, o carregamento das barras 5, 12, 13 e 17 são mostrados na Figura 34.

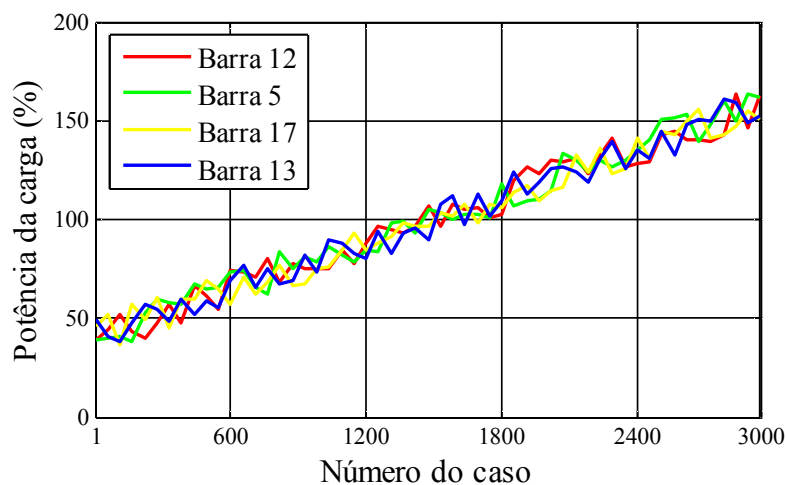


Figura 34 - Carregamento do sistema 33 barras

As simulações fornecem os dados que representam o comportamento do sistema sem controle (tensão não-regulada) e com o controle do CER (tensão regulada). A tensão e a distorção harmônica no PCC para cada caso é apresentada nos gráficos a seguir:

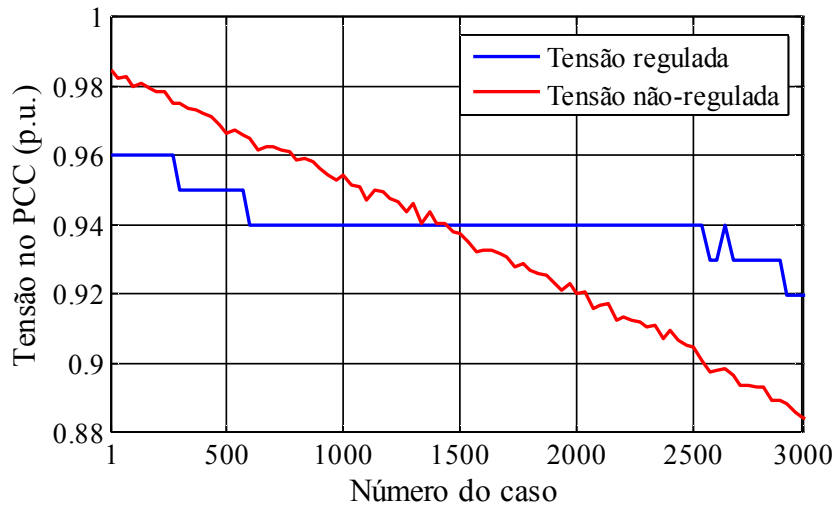


Figura 35 - Perfil de tensão para o sistema 33 barras

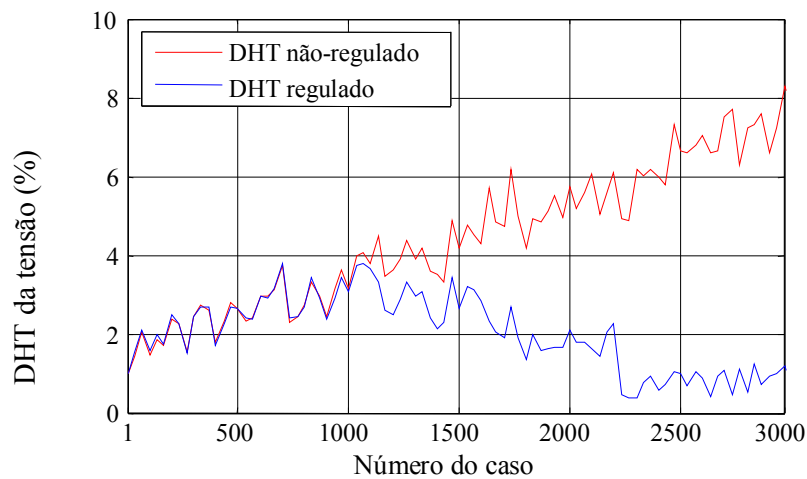


Figura 36 - DHT da tensão no PCC do sistema 33 barras

A tensão de 0,94 p.u. como referência foi escolhida por motivos didáticos, para verificação da metodologia, não representando uma tensão adequada para aplicação no campo. Entretanto, a escolha da tensão de referência pode ser feita utilizando outros critérios para a aplicação prática, sendo, nesse caso, necessária a utilização de maior

suporte capacitivo. Sendo assim, observando os resultados, nota-se que o desempenho do controle via CER proporciona um perfil de tensão adequado, considerando as restrições às quais esse estudo de caso está sujeito, evitando o afundamento de tensão e ao mesmo tempo limitando o DHT.

IV.3.3 Treinamento

Nesta etapa, são utilizados os valores de tensão não-regulada (V_{PCC}), pré-regulada (V_{PR}), número de filtros (NF) e ângulo de disparo do CER(α) obtidos no processo de aquisição de dados. Como demonstrado Figura 15 em III.4. 2, as entradas da RNA₁ são a V_{PCC} e as saídas NF, e, para a RNA₂, as entradas e saídas são, respectivamente, V_{PR} e α . Sendo assim, o algoritmo de treinamento é aplicado, a fim de obter o desempenho das redes neurais, mostrado nas tabelas a seguir:

Tabela 9 – Desempenho da rede neural RNA₁ para o sistema 33 barras

Rede Neural	Número de neurônios na camada oculta	Acertos na Validação (%)	Acertos no Teste (%)
1	20	97.20	97.60
2	19	97.20	97.60
3	18	97.07	97.60
4	17	97.07	97.33
5	16	97.07	97.47
6	15	97.07	97.73
7	14	97.33	97.73
8	13	97.33	97.60
9	12	97.07	97.47

Tabela 10 – Desempenho da rede neural RNA₂ para o sistema 33 barras

Rede Neural	Número de neurônios na camada oculta	Acertos na Validação (%)	Acertos no Teste (%)
1	20	93.80	92.93
2	19	89.67	89.27
3	18	88.73	87.80
4	17	92.73	91.47
5	16	91.60	91.07
6	15	92.80	91.80
7	14	92.27	91.33
8	13	89.67	89.13
9	12	93.67	92.13

Como se pode observar, as redes neurais apresentam resultados satisfatórios, com percentuais de acerto acima de 97% para a rede neural RNA₁ e 88% para RNA₂. As melhores configurações apresentam 97,33% e 93,80% de acertos na validação e 97,73% e 92,93% nos testes, respectivamente. Sendo assim, as redes escolhidas para a atuação no controle são as redes 7 para RNA₁ e 1 para RNA₂. Assim como no estudo do sistema IEEE 14 barras, mesmo nos casos onde a RNA não acerta, o erro é pequeno, de forma que a tensão regulada apresenta desvios mínimos. Da mesma forma, os casos considerados como erros representam desvios angulares inferiores a 3°, o que significa que os percentuais encontrados representam um resultado adequado.

IV.3.4 Validação

A validação do método de controle proposto aplicado no sistema 33 barras é feita através da simulação de dois testes com cenários (casos) não apresentados anteriormente às redes neurais. Nestes casos é avaliada a capacidade de controle do CER através das RNAs obtidas pela metodologia proposta.

O primeiro teste é realizado com a geração de casos com um padrão de variação de carregamento semelhante a uma curva diária de carga (SRINIVASAN, 1994; ASANO e BANDO, 2006), em intervalos de 15 minutos, geração distribuída fixa e injeção harmônica conforme a equação (11) em IV.2. O carregamento percentual em

relação ao caso base nas barras 12 e 13 e a operação da GD são ilustrado nas figuras 37 e 38. Os gráficos mostram a situação em cada intervalo de 15 minutos. Nota-se que a carga é baixa durante a madrugada, aumentando durante a manhã e estabilizando durante a tarde. O caso mais crítico ocorre por volta das 20 horas, onde o carregamento é máximo, sendo este horário conhecido como horário de ponta. Em seguida a potência consumida se reduz gradualmente até o final da noite. Neste primeiro teste, a GD se manteve com o comportamento constante..

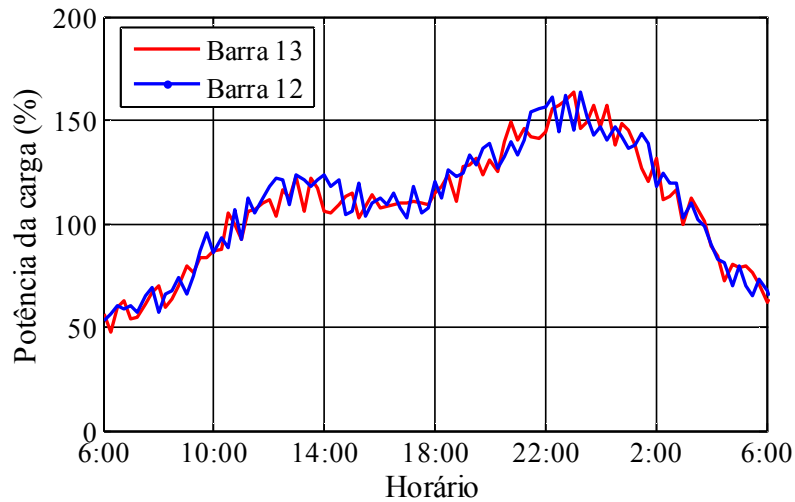


Figura 37 - Perfil de carga - teste 1 - sistema 33 barras

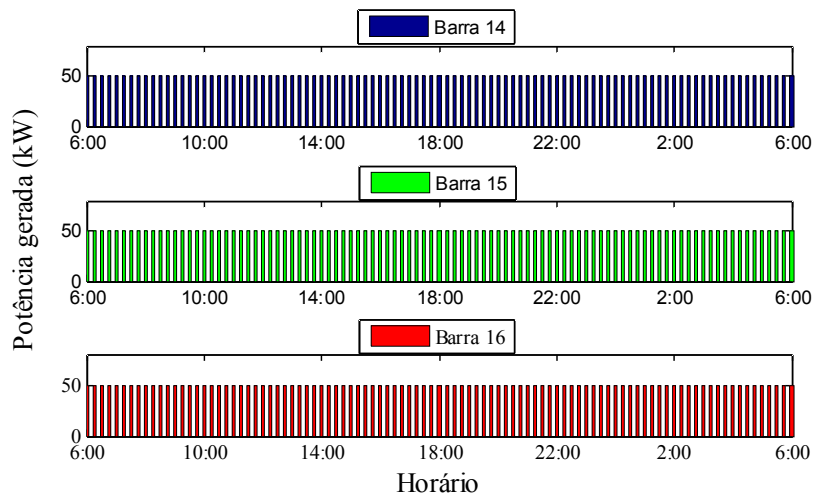


Figura 38 - GD - teste 1 - sistema 33 barras

Para estes cenários, as RNA's determinaram parâmetros para o ajuste da tensão e da distorção harmônica em níveis aceitáveis. O comportamento da tensão regulada e da

tensão não regulada, isto é, com o CER atuando e sem o CER, pode ser visualizado nas figuras 39 e 40. Nota-se que a tensão regulada se mantém muito próxima dos valores correspondentes aos patamares de carga baixa, média e alta. Além disso, há instantes em que o nível de tensão é ajustado para um valor mais alto. Isso ocorre para que o controle permita o chaveamento de um filtro a mais, com a finalidade de reduzir o DHT.

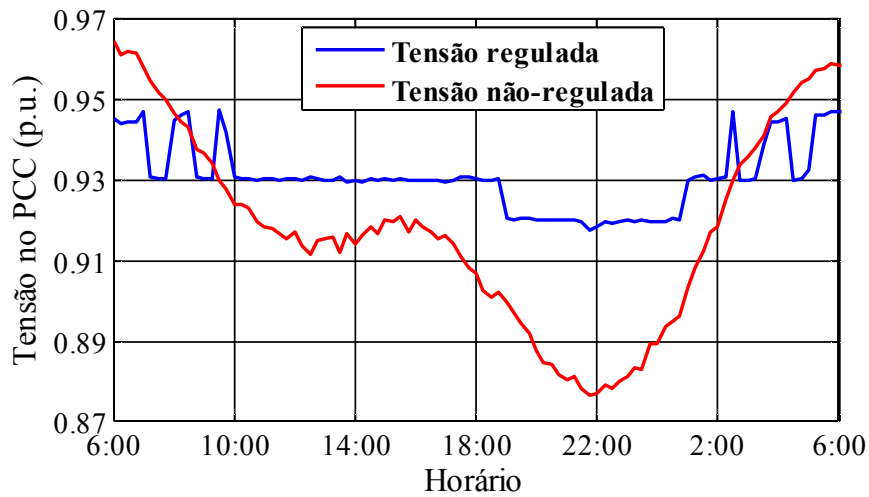


Figura 39 - Perfil de tensão - teste 1 - sistema 33 barras

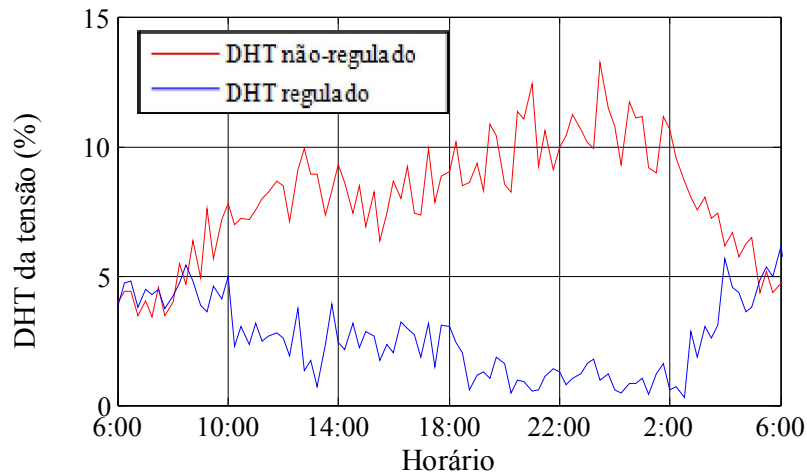


Figura 40 - DHT da tensão no PCC - teste 1 - sistema 33 barras

Os parâmetros do CER determinados pelas RNAs e a tensão para cada caso encontram-se na tabela a seguir:

Tabela 11 – Controle para o teste 1 - sistema 33 barras

Hora	Número de filtros	Ângulo do CER	Tensão no PCC	Hora	Número de filtros	Ângulo do CER	Tensão no PCC
06:00	0	10	0.9453	18:00	3	11	0.9304
06:15	0	14	0.9441	18:15	3	19	0.9299
06:30	0	13	0.9447	18:30	3	23	0.9302
06:45	0	14	0.9447	18:45	3	21	0.9305
07:00	0	26	0.9469	19:00	3	6	0.9204
07:15	0	2	0.9310	19:15	3	11	0.9202
07:30	0	6	0.9303	19:30	3	16	0.9205
07:45	0	9	0.9304	19:45	3	22	0.9205
08:00	1	14	0.9448	20:00	3	31	0.9202
08:15	1	22	0.9465	20:15	3	39	0.9201
08:30	1	26	0.9471	20:30	3	41	0.9201
08:45	1	5	0.9308	20:45	3	51	0.9200
09:00	1	6	0.9304	21:00	3	58	0.9200
09:15	1	11	0.9305	21:15	3	52	0.9201
09:30	2	26	0.9475	21:30	3	86	0.9196
09:45	2	19	0.9420	21:45	3	90	0.9177
10:00	2	5	0.9307	22:00	3	89	0.9184
10:15	2	5	0.9306	22:15	3	68	0.9200
10:30	2	6	0.9306	22:30	3	86	0.9196
10:45	2	11	0.9300	22:45	3	59	0.9200
11:00	2	15	0.9306	23:00	3	53	0.9200
11:15	2	15	0.9305	23:15	3	44	0.9199
11:30	2	17	0.9299	23:30	3	45	0.9201
11:45	2	21	0.9304	23:45	3	26	0.9199
12:00	2	17	0.9303	00:00	3	26	0.9198
12:15	2	23	0.9299	00:15	3	17	0.9200
12:30	3	3	0.9308	00:30	3	16	0.9208
12:45	2	21	0.9303	00:45	3	12	0.9201
13:00	2	20	0.9302	01:00	3	17	0.9299
13:15	2	19	0.9300	01:15	3	10	0.9310
13:30	3	3	0.9310	01:30	3	2	0.9311
13:45	2	17	0.9298	01:45	2	16	0.9299
14:00	2	22	0.9299	02:00	2	15	0.9305
14:15	2	17	0.9296	02:15	2	3	0.9308
14:30	2	14	0.9303	02:30	2	25	0.9472
14:45	2	17	0.9299	02:45	1	11	0.9302
15:00	2	11	0.9303	03:00	1	7	0.9300
15:15	2	12	0.9301	03:15	1	4	0.9307
15:30	2	10	0.9305	03:30	1	14	0.9392
15:45	2	16	0.9300	03:45	1	16	0.9447
16:00	2	11	0.9300	04:00	1	13	0.9446
16:15	2	14	0.9302	04:15	1	11	0.9454
16:30	2	16	0.9299	04:30	0	6	0.9302
16:45	2	20	0.9301	04:45	0	2	0.9304
17:00	2	17	0.9296	05:00	0	4	0.9327
17:15	2	23	0.9301	05:15	0	26	0.9463
17:30	3	4	0.9309	05:30	0	26	0.9465
17:45	3	10	0.9310	05:45	0	25	0.9473

O espectro de tensões e correntes harmônicas nodais injetadas nas barras de interesse, com e sem o CER, são apresentados nas figuras 41 e 42. É possível observar que as correntes harmônicas não se propagam para o sistema externo ao PCC, existindo apenas no *microgrid*. Dessa forma, é demonstrada a eficiência do controle proposto na filtragem harmônica. O caso referente ao horário das 14:00 foi escolhido para a análise de resultados por apresentar dados que permitem melhor visualização. Vale ressaltar que o comportamento do sistema nos demais casos é semelhante.

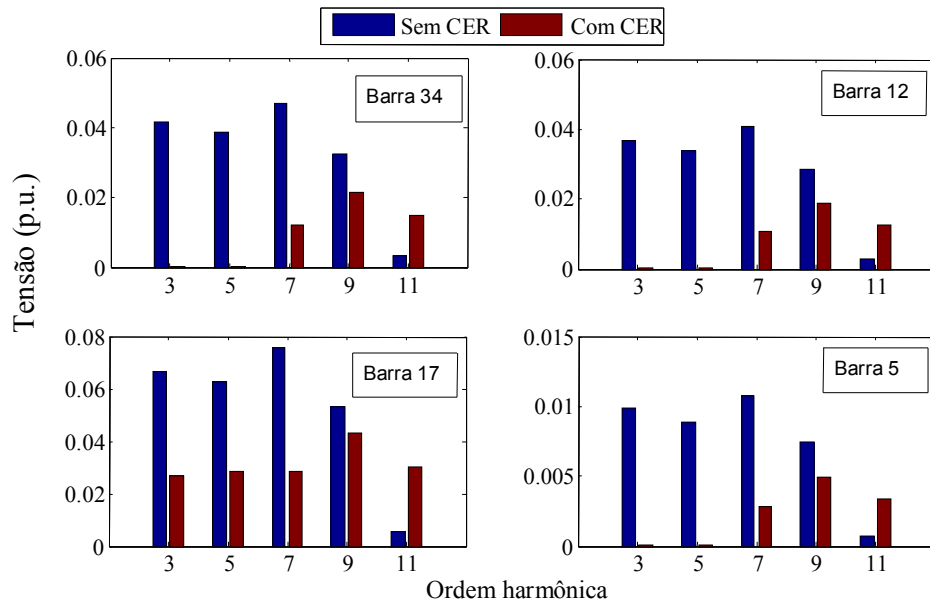


Figura 41 - Espectro de tensão no PCC (teste - sistema 33 barras)

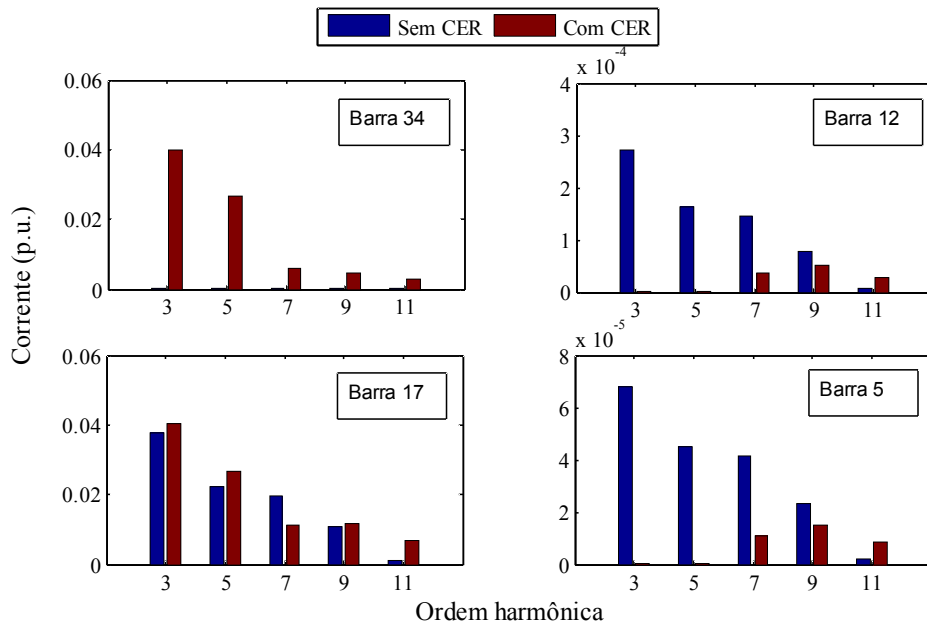


Figura 42 - Espectro de corrente injetada (teste - sistema 33 barras)

O segundo teste é realizado com a geração de casos com um padrão de variação de carregamento, geração distribuída e injeção de correntes iguais ao caso anterior, entretanto, é simulada uma perda de geração distribuída em cada fonte, em horários diferentes. O carregamento nas barras 12 e 13, a geração distribuída, o perfil de tensão e o DHT no PCC são ilustrados nas figuras 43 a 46. Os filtros e ângulos determinados pelas redes neurais são apresentados na Tabela 12. Note que, nesta simulação, a GD apresenta períodos de geração nula no horário de maior carregamento do sistema..

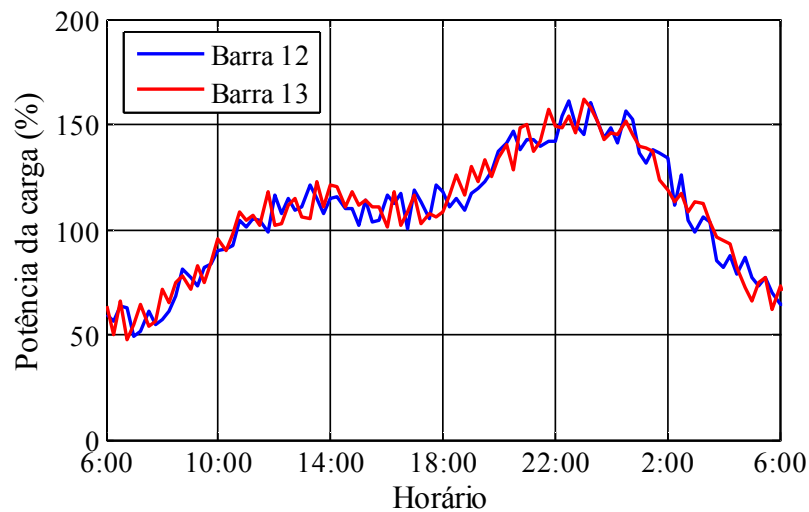


Figura 43 - Perfil de carga – teste 2 - sistema 33 barras

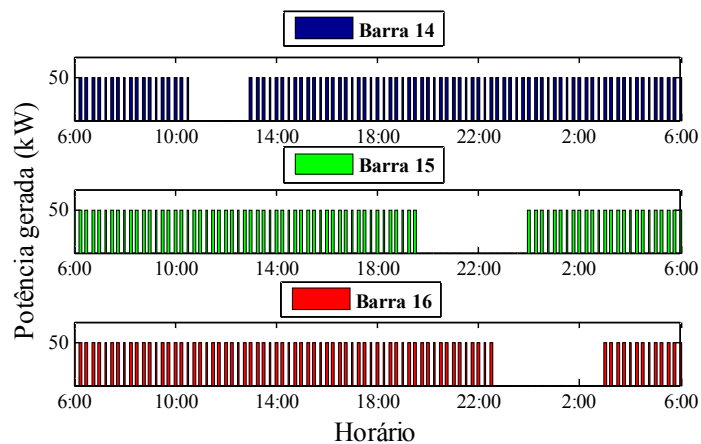


Figura 44 - GD – teste 2 - sistema 33 barras

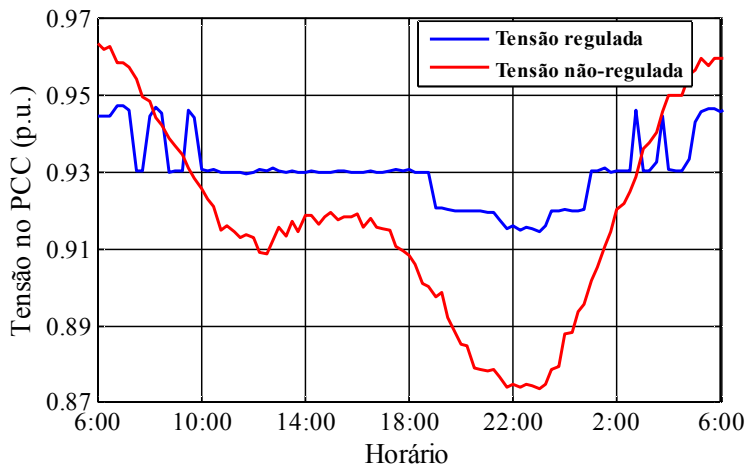


Figura 45 - Perfil de tensão – teste 2 - 33 barras

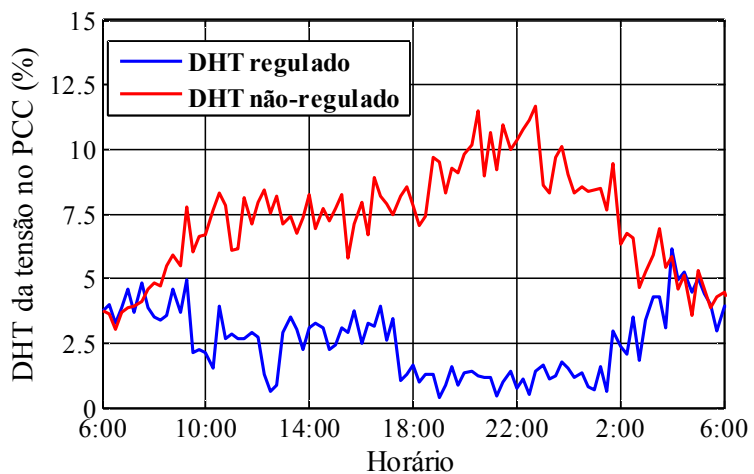


Figura 46 - DHT da tensão – teste 2 - 33 barras

Tabela 12 – Controle para o teste 2 - sistema 33 barras

Hora	Número de filtros	Ângulo do CER	Tensão no PCC	Hora	Número de filtros	Ângulo do CER	Tensão no PCC
06:00	0	11	0.9447	18:00	3	9	0.9308
06:15	0	13	0.9446	18:15	3	12	0.9300
06:30	0	12	0.9446	18:30	3	23	0.9301
06:45	0	26	0.9475	18:45	3	24	0.9299
07:00	0	26	0.9474	19:00	3	11	0.9209
07:15	0	26	0.9463	19:15	3	9	0.9207
07:30	0	2	0.9304	19:30	3	21	0.9204
07:45	0	10	0.9304	19:45	3	30	0.9201
08:00	1	11	0.9449	20:00	3	38	0.9201
08:15	1	24	0.9471	20:15	3	40	0.9202
08:30	1	25	0.9455	20:30	3	72	0.9201
08:45	1	2	0.9301	20:45	3	82	0.9199
09:00	1	6	0.9304	21:00	3	86	0.9197
09:15	1	10	0.9303	21:15	3	85	0.9197
09:30	2	21	0.9463	21:30	3	90	0.9178
09:45	2	23	0.9444	21:45	3	90	0.9152
10:00	2	2	0.9307	22:00	3	90	0.9160
10:15	2	6	0.9303	22:15	3	90	0.9151
10:30	2	10	0.9307	22:30	3	90	0.9159
10:45	2	21	0.9302	22:45	3	90	0.9155
11:00	2	18	0.9299	23:00	3	90	0.9146
11:15	2	22	0.9300	23:15	3	90	0.9160
11:30	2	25	0.9300	23:30	3	82	0.9199
11:45	2	23	0.9298	23:45	3	71	0.9200
12:00	2	25	0.9300	00:00	3	31	0.9202
12:15	3	8	0.9308	00:15	3	29	0.9200
12:30	3	8	0.9305	00:30	3	17	0.9198
12:45	3	3	0.9312	00:45	3	14	0.9205
13:00	2	20	0.9302	01:00	3	22	0.9305
13:15	2	24	0.9301	01:15	3	15	0.9306
13:30	2	17	0.9303	01:30	3	6	0.9312
13:45	2	22	0.9301	01:45	2	22	0.9300
14:00	2	13	0.9300	02:00	2	11	0.9305
14:15	2	14	0.9304	02:15	2	8	0.9303
14:30	2	17	0.9299	02:30	2	3	0.9306
14:45	2	14	0.9301	02:45	2	26	0.9464
15:00	2	12	0.9301	03:00	1	7	0.9303
15:15	2	16	0.9305	03:15	1	5	0.9306
15:30	2	14	0.9302	03:30	1	4	0.9326
15:45	2	14	0.9302	03:45	1	16	0.9447
16:00	2	13	0.9302	04:00	0	10	0.9309
16:15	2	19	0.9301	04:15	0	9	0.9306
16:30	2	16	0.9306	04:30	0	9	0.9305
16:45	2	19	0.9299	04:45	0	5	0.9333
17:00	2	20	0.9300	05:00	0	21	0.9433
17:15	2	21	0.9303	05:15	0	20	0.9460
17:30	3	5	0.9310	05:30	0	26	0.9468
17:45	3	6	0.9304	05:45	0	22	0.9465

A partir dos resultados obtidos nos testes, é possível verificar a eficácia da metodologia proposta. Nota-se, em especial, a capacidade de adaptação do sistema de controle a casos com perda de geração, ou seja, situações bastante diferentes das utilizadas no treinamento das RNA's.

IV.4 Sistema 9 barras

O sistema de distribuição 9 barras (GRAINGER e LEE, 1982) em sua configuração original é representado na Figura 47. Este é um sistema de distribuição radial equilibrado, com tensão nominal igual a 23 kV na subestação e potência ativa total igual a 12,368 MW e reativa igual a 4,186 Mvar no caso base. Os dados do sistema encontram-se no apêndice C.

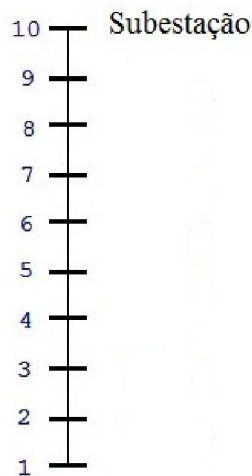


Figura 47 - Sistema 9 barras

Analogamente ao estudo do sistema 33 barras, para validação da metodologia, são introduzidas modificações neste sistema, como mostra a Figura 48. As barras 1 a 4 representam um *microgrid* e a barra 11 representa o PCC. Na *microgrid* encontra-se uma fonte de geração distribuída na barra 12, conectada à barra 2 e uma carga não-linear na barra 3. No PCC se encontra o CER, com 3 filtros sintonizados para 3^a, 5^a e 7^a harmônicas.

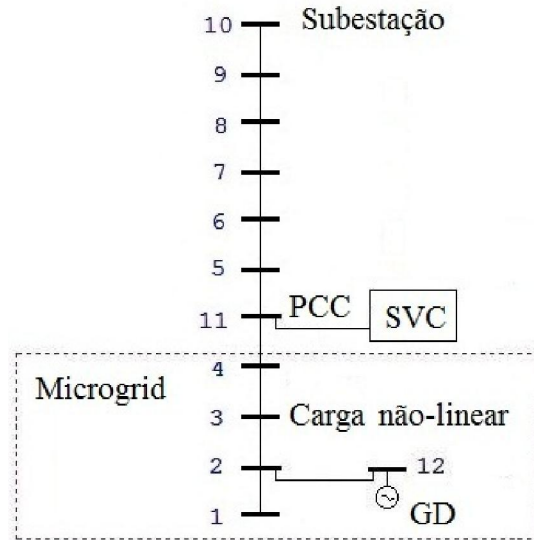


Figura 48 - Sistema 9 barras modificado

A carga no sistema, a geração distribuída e a injeção de correntes harmônicas devido à carga não-linear e à GD em cada caso são descritas, respectivamente, pelas equações (10), (12), (13) e (15), apresentadas em III.4.2 e III.2.3. O fator de variação de carga para as equações (10) e (11) é apresentado pela expressão (23), e o fator de variação para o a GD, isto é, para as equações (14) e (15), é igual ao da equação (24):

$$F_{C_k} = 0,4 + 1,2 \left(\frac{c}{N_c} \right) \quad (25)$$

$$F_{GD_w} = 1,0 \quad (26)$$

onde:

- C Número do caso;
- N_c Número total de casos;
- F_{C_k} Fator de carregamento em uma barra k ;
- F_{GD_w} Fator de geração em uma barra w .

O valor dos carregamentos mínimo e máximo adotados são, respectivamente, 50% a 150% da carga no caso base. Além disso, as componentes harmônicas I_{H_w} e I_{H_w} ,

adotadas para a injeção de correntes harmônicas devido à carga não-linear e aos equipamentos associados à conexão da GD, respectivamente, são baseadas em (MOK *et al.*, 2011; CHEN e SUN, 2011; WANG *et al.*, 2011).

IV.4.1 Avaliação das dimensões do CER

Nesta etapa, assim como nos casos anteriores, dois fluxos de potência harmônicos são calculados, respectivamente para os patamares de carga mais leve e mais pesada, com a inclusão da carga não-linear, GD e CER. Os resultados obtidos e as dimensões do CER são apresentados nas tabelas 13 e 14:

Tabela 13 – Carregamento mínimo e máximo do sistema 9 barras

Carregamento	Tensão no PCC	Potência reativa necessária para regular a tensão
50% (mínimo)	0,966 p.u.	496 kvar Indutiva
150% (máximo)	0,859 p.u.	1416 kvar Capacitiva

Tabela 14 – Dados do CER para o sistema 9 barras

Componente	Potência reativa
Reator controlado por Tiristor (RCT)	500 kvar Indutiva ($\alpha = 0^\circ$)
Filtro de 3ª Harmônica	500 kvar capacitiva
Filtro de 5ª Harmônica	500 kvar capacitiva
Filtro de 7ª Harmônica	500 kvar capacitiva

Note que o CER proposto possui potência reativa que varia de 500 kvar indutivo, com o ângulo de disparo do RCT em 0° e todos os filtros desligados, a 1500 kvar capacitiva com todos os filtros ligados e o ângulo do RCT em 90° .

IV.4.2 Aquisição de dados

A partir dos dados obtidos na tabela 8, é realizado o processo de aquisição de dados, conforme o algoritmo apresentado na Figura 15 em III.4.2, onde 5000 casos são simulados.

Em procedimento análogo ao das seções IV.2.2 e IV.2.3, algumas barras de interesse foram escolhidas para a visualização do carregamento do sistema. Vale ressaltar que as cargas do sistema apresentam um comportamento comum. Portanto, o carregamento das barras 3, 4, 5 e 8 são mostrados na Figura 49.

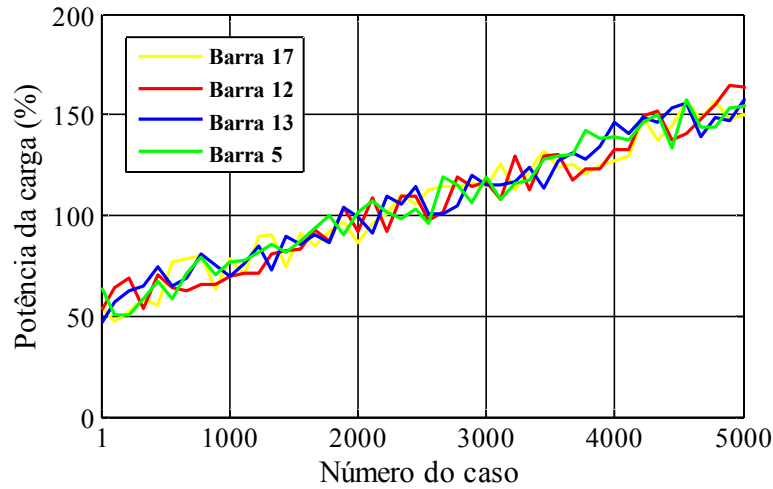


Figura 49 - Carregamento do sistema 9 barras

A partir destas simulações, é possível analisar o comportamento do sistema com e sem o controle proposto. A tensão e a distorção harmônica no PCC para cada caso é apresentada nos gráficos a seguir:

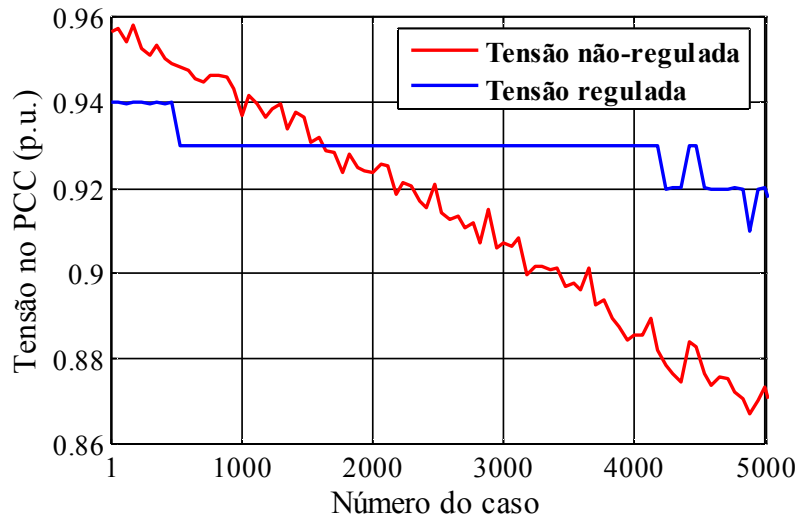


Figura 50 - Perfil de tensão para o sistema 9 barras

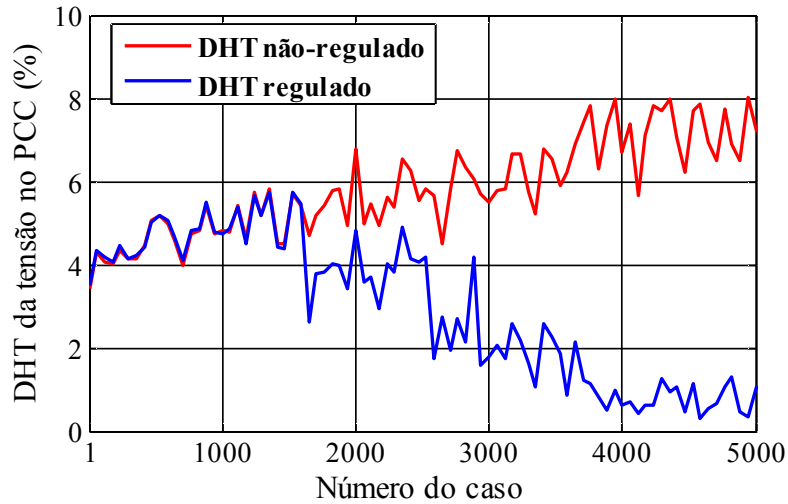


Figura 51 - DHT da tensão para o sistema 9 barras

Observando os resultados, nota-se que o desempenho do controle via CER proporciona um perfil de tensão adequado e ao mesmo tempo limita o DHT. Vale ressaltar que, assim como no item IV.3.2, a tensão de referência foi escolhida por motivos didáticos, para apresentação de resultados. Portanto, uma nova tensão de referência pode ser adotada, adequada a aplicações práticas, sendo necessário, nesse caso, maior suporte de reativos (bancos de capacitores).

IV.4.3 Treinamento

Nesta etapa, são utilizados os valores de tensão não-regulada (V_{PCC}), pré-regulada (V_{PR}), número de filtros (NF) e ângulo de disparo do CER (α) obtidos no processo de aquisição de dados. Como demonstrado Figura 15 em III.4. 2, as entradas da RNA_1 são a V_{PCC} e as saídas NF, e, para a RNA_2 , as entradas e saídas são, respectivamente, V_{PR} e α . Sendo assim, o algoritmo de treinamento é aplicado, a fim de obter o desempenho das redes neurais, mostrado nas tabelas a seguir:

Tabela 15 – Desempenho da rede neural RNA₁ para o sistema 9 barras

Rede Neural	Número de neurônios na camada oculta	Acertos – Validação (%)	Acertos – Teste (%)
1	20	99,76	99,60
2	19	99,12	98,64
3	18	99,76	99,68
4	17	99,76	99,68
5	16	99,68	99,52
6	15	99,12	98,56
7	14	99,04	98,56
8	13	99,12	98,64
9	12	99,84	99,68

Tabela 16 – Desempenho da rede neural RNA₂ para o sistema 9 barras

Rede Neural	Número de neurônios na camada oculta	Acertos – Validação (%)	Acertos – Teste (%)
1	20	94,27	93,87
2	19	94,27	94,00
3	18	91,73	92,00
4	17	79,47	80,67
5	16	85,60	85,47
6	15	78,53	78,13
7	14	70,00	68,53
8	13	73,73	74,53
9	12	70,67	70,80

Analogamente aos casos estudados anteriormente, as redes neurais apresentam resultados satisfatórios, com percentuais de acerto acima de 99% para a rede neural RNA₁ e 70% para RNA₂. As melhores configurações apresentam 99,84% e 94,27% de acertos na validação e 99,68% e 94,00% nos testes, respectivamente. Sendo assim, as redes escolhidas para a atuação no controle são as redes 9 e 2, respectivamente para

RNA₁ e RNA₂. Assim como nos sistemas-teste anteriores, os erros das RNAs são muito pequenos e não comprometem a metodologia. Novamente, os casos considerados como erros representam desvios angulares inferiores a 3°, o que significa que os percentuais encontrados representam um resultado adequado.

IV.4.4 Validação

A validação do método de controle proposto aplicado ao sistema 9 barras é feita através da simulação de dois testes com cenários (casos) não apresentados anteriormente às redes neurais. Nestes casos é avaliada a capacidade de controle do CER através das RNAs obtidas pela metodologia proposta.

O primeiro teste é realizado com a geração de casos com um padrão de variação de carregamento semelhante a uma curva diária de carga (SRINIVASAN, 1994; ASANO e BANDO, 2006), em intervalos de 15 minutos, geração distribuída fixa e injeções harmônicas conforme as equações (11) e (15). O carregamento percentual em relação ao caso base nas barras 4 e 5 e a operação da GD são ilustrados nas figuras 52 e 53. Os gráficos mostram a situação em cada intervalo de 15 minutos. Nota-se que a carga é baixa durante a madrugada, aumentando durante a manhã e estabilizando durante a tarde. O caso mais crítico ocorre por volta das 20 horas, onde o carregamento é máximo, sendo este horário conhecido como horário de ponta. Em seguida a potência consumida se reduz gradualmente até o final da noite. Neste primeiro teste, a GD se manteve com o comportamento constante.

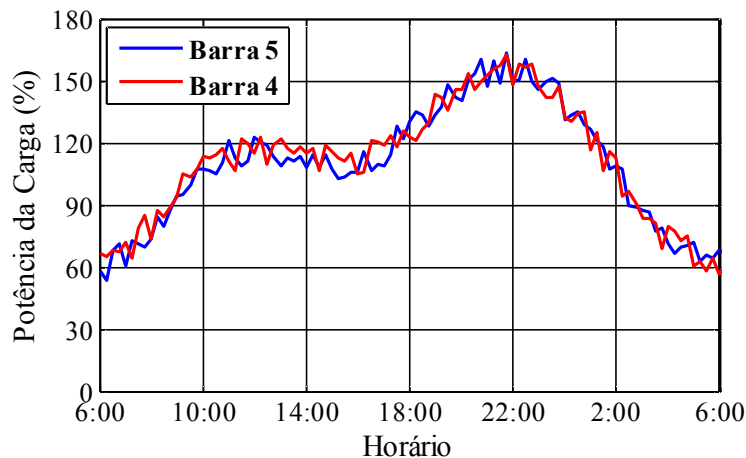


Figura 52 - Perfil de carga - teste 1 - sistema 9 barras

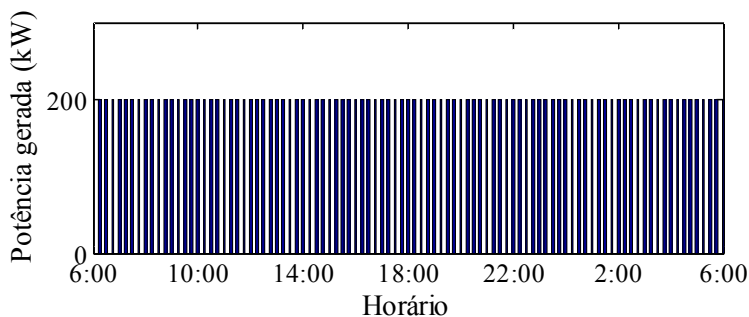


Figura 53 - GD - teste 1 - sistema 9 barras

Para estes cenários, as RNAs determinaram parâmetros para o ajuste da tensão e da distorção harmônica em níveis aceitáveis. O comportamento da tensão regulada e da tensão não regulada, isto é, com o CER atuando e sem o CER, pode ser visualizado nas figuras 54 e 55. Nota-se que a tensão regulada se mantém muito próxima dos valores correspondentes aos patamares de carga baixa, média e alta. Além disso, há instantes em que o nível de tensão é ajustado para um valor mais alto. Isso ocorre para que o controle permita o chaveamento de um filtro a mais, com a finalidade de reduzir o DHT.

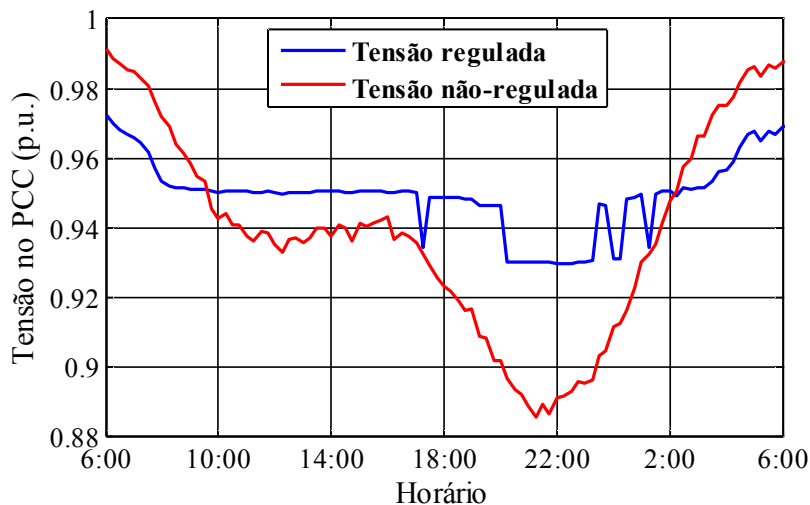


Figura 54 - Perfil de tensão – teste 1 - sistema 9 barras

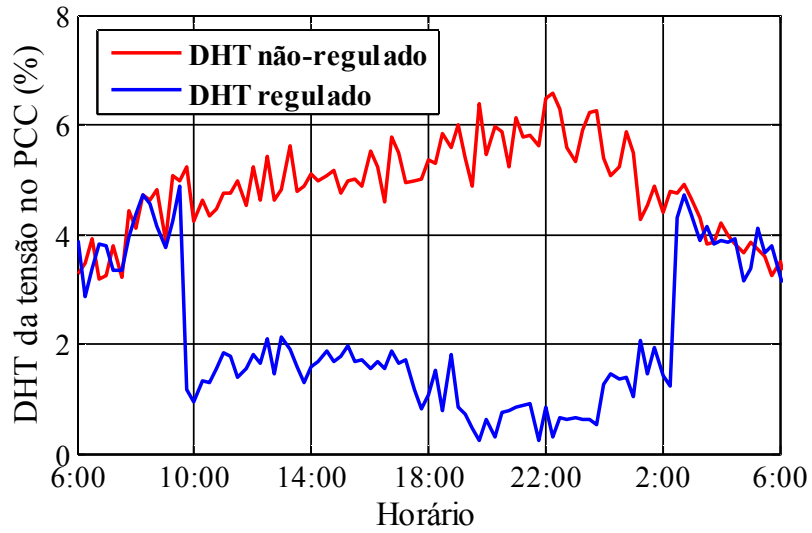


Figura 55 - DHT da tensão – teste 1 - sistema 9 barras

Os parâmetros do CER determinados pelas RNAs e a tensão para cada caso encontram-se na tabela a seguir:

Tabela 17 – Controle para o teste 1 - sistema 9 barras

Hora	Número de filtros	Ângulo do CER	Tensão no PCC	Hora	Número de filtros	Ângulo do CER	Tensão no PCC
06:00	0	0	0.9726	18:00	2	31	0.9486
06:15	0	0	0.9700	18:15	2	36	0.9489
06:30	0	0	0.9684	18:30	2	47	0.9486
06:45	0	0	0.9667	18:45	2	66	0.9484
07:00	0	0	0.9661	19:00	2	62	0.9485
07:15	0	0	0.9644	19:15	3	21	0.9463
07:30	0	0	0.9619	19:30	3	23	0.9465
07:45	0	0	0.9573	19:45	3	44	0.9467
08:00	0	0	0.9533	20:00	3	45	0.9467
08:15	0	3	0.9518	20:15	3	11	0.9303
08:30	0	15	0.9516	20:30	3	18	0.9301
08:45	0	22	0.9515	20:45	3	22	0.9301
09:00	0	31	0.9513	21:00	3	32	0.9303
09:15	0	45	0.9511	21:15	3	44	0.9302
09:30	0	50	0.9510	21:30	3	30	0.9302
09:45	1	18	0.9506	21:45	3	40	0.9301
10:00	1	25	0.9503	22:00	3	24	0.9300
10:15	1	21	0.9505	22:15	3	23	0.9299
10:30	1	30	0.9505	22:30	3	19	0.9299
10:45	1	31	0.9505	22:45	3	13	0.9304
11:00	1	42	0.9505	23:00	3	14	0.9304
11:15	1	48	0.9502	23:15	3	13	0.9306
11:30	1	36	0.9504	23:30	3	40	0.9467
11:45	1	40	0.9506	23:45	3	35	0.9467
12:00	1	51	0.9500	00:00	2	15	0.9312
12:15	1	78	0.9499	00:15	2	12	0.9311
12:30	1	45	0.9503	00:30	2	66	0.9484
12:45	1	43	0.9503	00:45	2	33	0.9486
13:00	1	49	0.9501	01:00	2	15	0.9498
13:15	1	44	0.9503	01:15	1	9	0.9344
13:30	1	34	0.9506	01:30	1	51	0.9499
13:45	1	34	0.9506	01:45	1	30	0.9505
14:00	1	42	0.9505	02:00	1	12	0.9508
14:15	1	31	0.9505	02:15	1	2	0.9494
14:30	1	34	0.9504	02:30	0	35	0.9514
14:45	1	47	0.9502	02:45	0	26	0.9512
15:00	1	29	0.9505	03:00	0	9	0.9516
15:15	1	32	0.9504	03:15	0	9	0.9515
15:30	1	29	0.9505	03:30	0	0	0.9536
15:45	1	26	0.9504	03:45	0	0	0.9564
16:00	1	23	0.9503	04:00	0	0	0.9565
16:15	1	47	0.9504	04:15	0	0	0.9588
16:30	1	39	0.9505	04:30	0	0	0.9631
16:45	1	43	0.9504	04:45	0	0	0.9667
17:00	1	49	0.9502	05:00	0	0	0.9677
17:15	1	9	0.9342	05:15	0	0	0.9649
17:30	2	14	0.9487	05:30	0	0	0.9679
17:45	2	24	0.9488	05:45	0	0	0.9670

O espectro de tensões e correntes harmônicas nodais injetadas nas barras de interesse, com e sem o CER, são apresentados nas figuras 56 e 57. É possível observar que as correntes harmônicas não se propagam para o sistema externo ao PCC, existindo apenas no *microgrid*. Dessa forma, é demonstrada a eficiência do controle proposto na filtragem harmônica. O caso referente ao horário das 17:15 foi escolhido para a análise de resultados por apresentar dados que permitem melhor visualização. Vale ressaltar que o comportamento do sistema nos demais casos é semelhante.

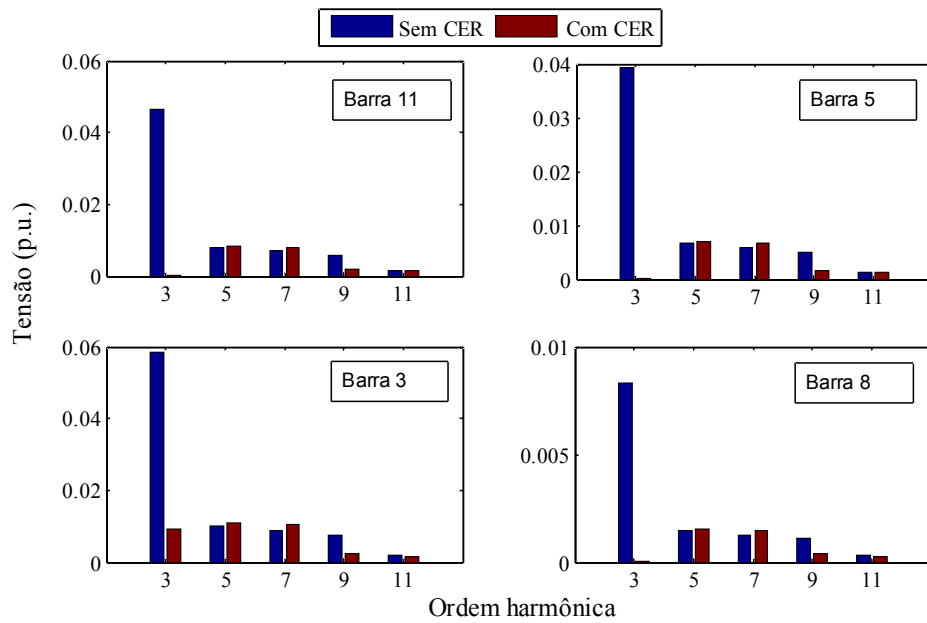


Figura 56 - Espectro de tensão no PCC (teste - sistema 9 barras)

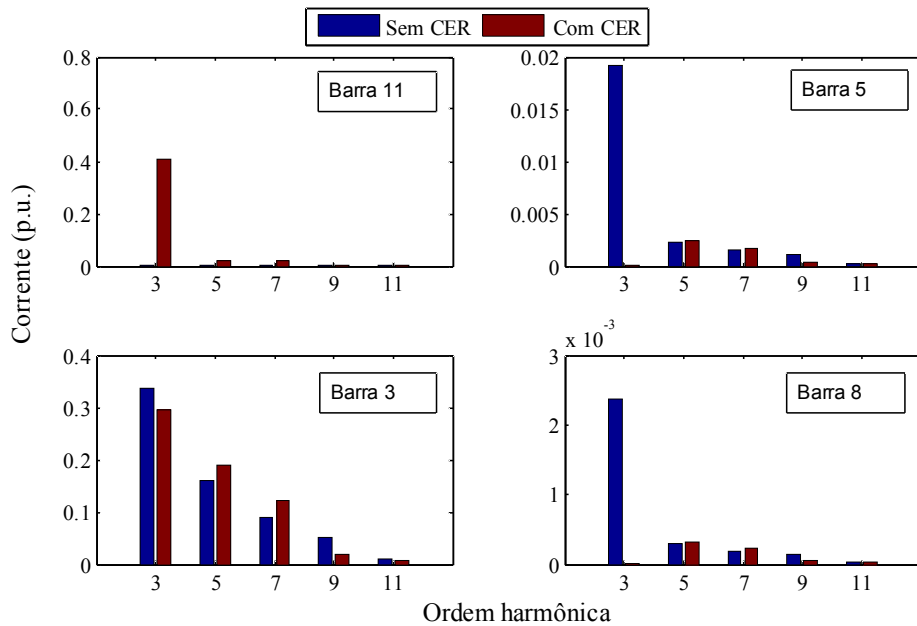


Figura 57 - Espectro de corrente injetada (teste - sistema 9 barras)

O segundo teste é realizado com a geração de casos com um padrão de variação de carregamento, geração distribuída e injeção de correntes iguais ao caso anterior, entretanto, é simulada uma perda de geração distribuída no horário de ponta do sistema. O carregamento nas barras 4 e 5, a geração distribuída, o perfil de tensão e o DHT no PCC são ilustrados nas figuras 58 a 61. Os filtros e ângulos determinados pelas redes neurais são apresentados na Tabela 18.

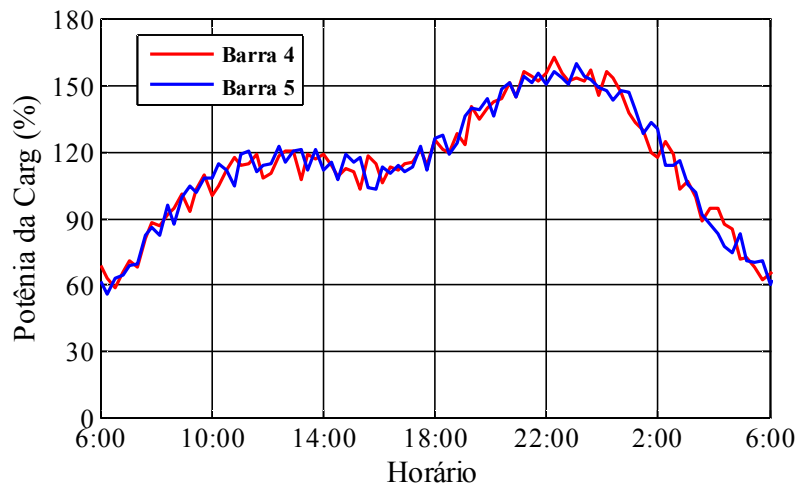


Figura 58 - Perfil de carga – teste 2 - sistema 9 barras

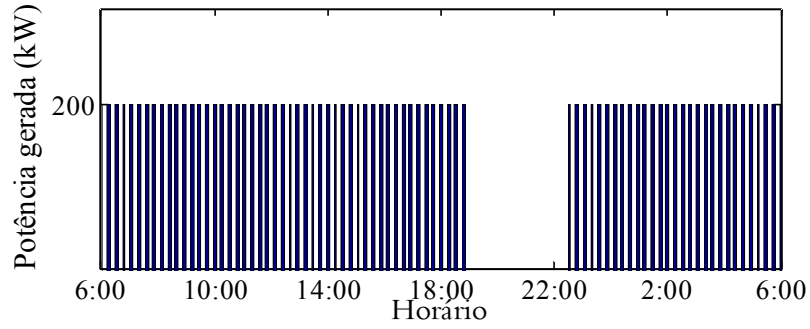


Figura 59 - GD – teste 2 - sistema 9 barras

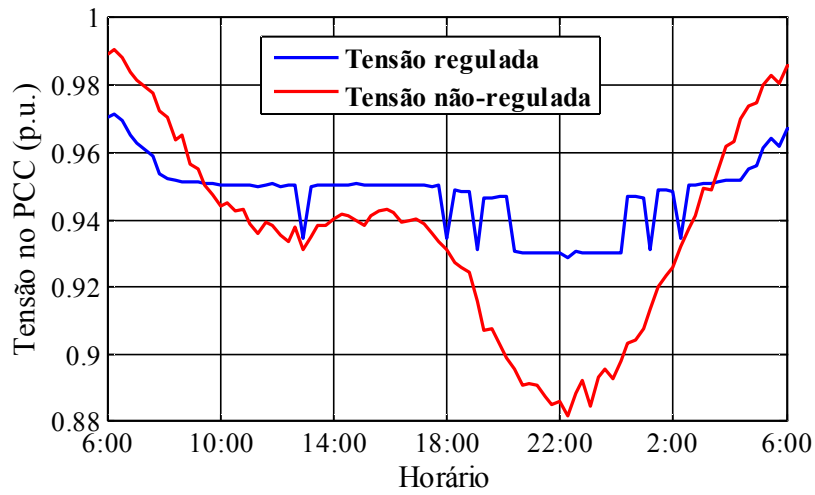


Figura 60 - Perfil de tensão – teste 2 - 9 barras

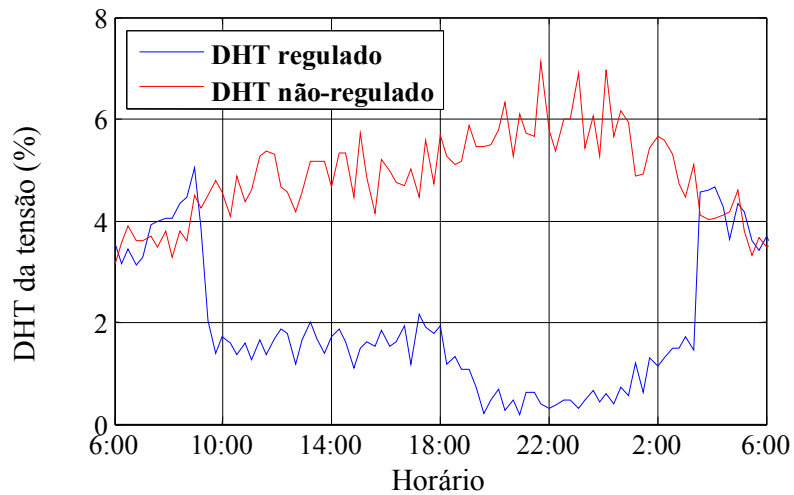


Figura 61 - DHT da tensão – teste 2 - 9 barras

Tabela 18 – Controle para o teste 2 - sistema 9 barras

Hora	Número de filtros	Ângulo do CER	Tensão no PCC	Hora	Número de filtros	Ângulo do CER	Tensão no PCC
06:00	0	0	0.9684	18:00	2	24	0.9486
06:15	0	0	0.9703	18:15	2	27	0.9485
06:30	0	0	0.9716	18:30	2	5	0.9311
06:45	0	0	0.9693	18:45	3	26	0.9465
07:00	0	0	0.9652	19:00	3	25	0.9466
07:15	0	0	0.9628	19:15	3	41	0.9468
07:30	0	0	0.9611	19:30	3	68	0.9467
07:45	0	0	0.9589	19:45	3	15	0.9305
08:00	0	0	0.9538	20:00	3	27	0.9303
08:15	0	0	0.9521	20:15	3	24	0.9301
08:30	0	16	0.9517	20:30	3	27	0.9303
08:45	0	12	0.9515	20:45	3	37	0.9304
09:00	0	38	0.9513	21:00	3	47	0.9302
09:15	0	43	0.9513	21:15	3	42	0.9303
09:30	1	6	0.9507	21:30	3	59	0.9289
09:45	1	13	0.9506	21:45	3	34	0.9304
10:00	1	21	0.9505	22:00	3	22	0.9299
10:15	1	19	0.9504	22:15	3	48	0.9301
10:30	1	25	0.9502	22:30	3	19	0.9299
10:45	1	23	0.9502	22:45	3	14	0.9301
11:00	1	38	0.9504	23:00	3	21	0.9301
11:15	1	48	0.9500	23:15	3	8	0.9300
11:30	1	36	0.9504	23:30	3	40	0.9467
11:45	1	40	0.9506	23:45	3	36	0.9468
12:00	1	51	0.9500	00:00	3	25	0.9464
12:15	1	70	0.9501	00:15	2	11	0.9313
12:30	1	43	0.9505	00:30	2	43	0.9487
12:45	1	13	0.9344	00:45	2	32	0.9488
13:00	1	53	0.9498	01:00	2	23	0.9486
13:15	1	41	0.9505	01:15	1	11	0.9344
13:30	1	41	0.9505	01:30	1	43	0.9503
13:45	1	33	0.9504	01:45	1	29	0.9504
14:00	1	29	0.9505	02:00	1	9	0.9510
14:15	1	29	0.9504	02:15	1	10	0.9508
14:30	1	35	0.9506	02:30	0	46	0.9511
14:45	1	41	0.9505	02:45	0	21	0.9516
15:00	1	30	0.9505	03:00	0	17	0.9516
15:15	1	25	0.9502	03:15	0	1	0.9519
15:30	1	24	0.9503	03:30	0	0	0.9552
15:45	1	27	0.9504	03:45	0	0	0.9563
16:00	1	37	0.9505	04:00	0	0	0.9615
16:15	1	34	0.9504	04:15	0	0	0.9644
16:30	1	32	0.9504	04:30	0	0	0.9619
16:45	1	39	0.9505	04:45	0	0	0.9672
17:00	1	50	0.9501	05:00	0	0	0.9664
17:15	1	74	0.9501	05:15	0	0	0.9679
17:30	1	13	0.9343	05:30	0	0	0.9682
17:45	2	20	0.9487	05:45	0	0	0.9677

A partir dos resultados obtidos nos testes, é possível verificar a eficácia da metodologia proposta. Assim como em IV.3.4, o sistema de controle foi capaz de atuar satisfatoriamente mesmo em caso de perda de geração, ou seja, em uma situação bastante diferente do universo de casos utilizados no treinamento das RNA's.

Capítulo V

Conclusões

V.1 Conclusões

O presente trabalho apresentou uma estratégia de controle de tensão e harmônicos através da compensação estática de reativos, associada a filtros harmônicos. Para tanto, foram utilizadas duas redes neurais artificiais, para a determinação do ajuste de parâmetros do CER, isto é, o ângulo de disparo do RCT e número de filtros.

Os resultados obtidos da simulação de diversos sistemas-teste compreendendo cenários de operação distintos mostraram a eficiência da metodologia proposta para a estratégia de controle. As redes neurais se mostraram capazes de processar dados com relações não-lineares contendo incertezas, de forma eficiente e robusta. Além disso, o CER com filtros harmônicos apresentou capacidade de controle preciso de tensão frente a cenários muito variados de operação. Considerando a adaptabilidade inerente ao controle via RNA, a metodologia presente neste trabalho pode ser uma solução para sistemas com CER já existente. Nesse caso, o controle proposto confere inteligência ao equipamento.

Por outro lado, o modelo proposto representa uma alternativa bastante adequada ao contexto das *smart grids*, uma forte tendência atual, onde a flexibilidade, rapidez e eficiência do sistema são cada vez mais exigidas (HAMIDI *et al.*, 2010). Embora as redes inteligentes ainda estejam em fase de desenvolvimento, é importante pesquisar no

presente, para que os projetos futuros se tornem viáveis. Ademais, a metodologia apresentada é igualmente adequada a sistemas no contexto atual, uma vez que geração distribuída e cargas não-lineares são presentes nos sistemas de distribuição atuais.

V.2 Sugestões de trabalhos Futuros

Como sugestões de trabalhos futuros tem-se:

- (i) Desenvolvimento de um sistema de controle análogo ao descrito neste trabalho, porém, com uma função extra de balanceamento de tensão em sistemas desequilibrados;
- (ii) Análise dinâmica, contemplando fenômenos transitórios;
- (iii) Pesquisa para *microgrids* com este tipo de controle incluindo situações de faltas e ilhação;
- (iv) Aplicação da metodologia proposta utilizando dados medidos em campo;
- (v) Estudo de sistemas de potência com o controle proposto no simulador digital em tempo real (RTDS – *Real Time Digital Simulator*®);
- (vi) Implementação do método proposto em Hardware.

Além disso, a pesquisa de outras técnicas com a mesma finalidade também apresenta um campo interessante de investigação. Visto que, com o aumento da exigência com relação à eficiência e qualidade de energia, novas tecnologias estão em desenvolvimento. Sendo assim, o campo de pesquisa sobre os temas abordados neste trabalho apresenta possibilidades diversas e de interesse ao setor elétrico.

Apêndice A

Conceitos básicos sobre redes neurais artificiais

A. 1 Introdução

A aplicação de Redes Neurais Artificiais (RNA) é motivada pelo reconhecimento de que o cérebro humano processa informações de uma forma distinta do computador digital. Devido à sua capacidade de organização da estrutura neuronal, o cérebro realiza processamentos, como reconhecer padrões, mais rapidamente que o computador digital. O principal atrativo para o uso de RNAs na solução de problemas é a capacidade de aprender através de exemplos e de generalizar o conhecimento aprendido (HAYKIN, 1998). As principais características das redes neurais são:

- Possibilidade de considerar o comportamento não-linear dos fenômenos físicos;
- Necessidade de pouco conhecimento estatístico sobre o ambiente onde a rede está inserida;
- Capacidade de aprendizagem, obtida através de exemplos entrada/saída que sejam representativos do ambiente;
- Habilidade de aproximar qualquer mapeamento entrada/saída de natureza contínua;
- Adaptabilidade;

- Generalização;
- Tolerância a falhas;
- Informação contextual;
- Armazenamento do conhecimento adquirido, através de forças de conexão entre neurônios, conhecidas como pesos sinápticos.

Sendo assim, cada vez mais as redes neurais vêm sendo empregadas nos mais diversos campos do conhecimento.

A. 2 O Cérebro humano

O cérebro é composto de neurônios, conectados entre si através de sinapses, formando uma grande rede, chamada rede neural. As sinapses transmitem estímulos através de diferentes concentrações de sódio e potássio, resultando na excitação ou inibição da atividade do neurônio. Esta rede proporciona uma ampla capacidade de processamento paralelo e armazenamento de informações. É importante ressaltar que os neurônios que formam redes neurais artificiais são primitivos em comparação com aqueles encontrados no cérebro (DE OLIVEIRA, 2005).

A. 3 Modelagem do neurônio artificial

O neurônio artificial é uma unidade de processamento de informação fundamental para a operação de uma RNA. Cada neurônio é constituído de três elementos básicos em seu modelo:

- **Sinapse:** Conexão caracterizada por um elemento multiplicador chamado peso sináptico. Este peso sináptico tem a função de determinar a importância do sinal (entrada) a ele apresentado.
- **Somador:** Combinador linear, que realiza o somatório das entradas do neurônio, ponderadas pela ação dos respectivos pesos sinápticos.
- **Função de ativação:** Função que determina a amplitude do sinal de saída de acordo com o valor da soma ponderada das entradas. Os tipos básicos de função de ativação, conforme ilustradas na Figura 62, são: linear, linear por partes (saturada), sigmóide e função de limiar.

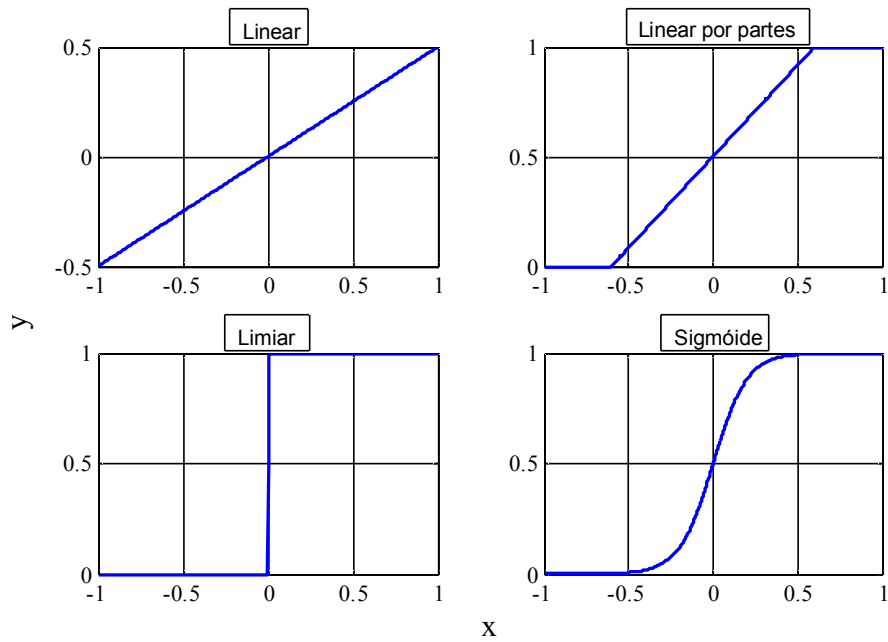


Figura 62 - Funções de ativação

onde as funções são definidas por:

Função linear $y = kx$ (27)

Função linear por partes $\begin{cases} y = 0, x \leq x_0 \\ y = kx, x_0 < x \leq x_1 \\ y = 1, x > x_1 \end{cases}$ (28)

Função de Limiar $\begin{cases} y = -1, x \leq 0 \\ y = 1, x > 0 \end{cases}$ (29)

Função sigmóide $y = \frac{1}{1 + e^{-x/T}}$ (30)

onde:

- x_0 Limite inferior de x;
- x_1 Limite superior de x;
- k Constante de inclinação da rampa;
- T Constante de inclinação da sigmóide.

O *bias* é um elemento de aplicação externa e tem a capacidade de aumentar ou diminuir a entrada da função de ativação. O modelo de neurônio artificial foi apresentado na figura 12, em III.3. Como visto nesta ilustração, as entradas são multiplicadas por pesos e, em seguida, são somadas. A soma das entradas, por sua vez, é o argumento da função de ativação, conforme a equação a seguir:

$$y = F\left(\sum_{i=1}^m w_i x_i\right) \quad (31)$$

onde:

x_i	Variável de entrada i no neurônio;
w_i	Peso sináptico da entrada i ;
$F(.)$	Função de ativação, ou seja, a função determinante do estado de saída do neurônio;
y	Variável de saída do neurônio;
m	Número de entradas.

A. 4 Arquiteturas de rede

A definição da arquitetura de uma RNA é muito importante devido ao fato de que seu arranjo depende do problema a ser tratado pela rede. Além disso, a arquitetura da rede está intimamente relacionada ao algoritmo de aprendizagem usado para treinamento. Na escolha da estrutura a ser utilizada são analisados: número de camadas, número de nós, tipo de conexões entre os nós e a topologia da rede (DE OLIVEIRA, 2005).

A. 5 Aprendizagem

O objetivo da aprendizagem é determinar a intensidade das conexões entre os neurônios em uma rede neural, ou seja, o valor dos pesos sinápticos. O conjunto de

procedimentos bem definidos para adaptar os parâmetros de uma RNA, de modo a fazer com que ela aprenda determinada função, recebe o nome de *algoritmo de aprendizagem*. O que distingue os diversos algoritmos de aprendizagem existentes é o modo pelo qual o ajuste de pesos é feito. Aplicar um algoritmo de aprendizagem a uma determinada rede neural consiste em apresentar à rede padrões de informação num processo iterativo onde os pesos sinápticos serão ajustados, adquirindo dessa maneira o conhecimento do ambiente no qual irá operar.

Basicamente há dois tipos de aprendizagem: com professor e sem professor. A aprendizagem com professor, ou supervisionada, é baseada na apresentação de pares entrada/saída, de forma que a RNA aprenda a reconhecer o padrão de entrada e classificá-lo conforme a saída conhecida. A aprendizagem sem professor não apresenta saídas conhecidas. Um exemplo de aprendizado sem professor é o aprendizado por reforço. Neste processo, a tendência da rede a produzir determinada saída, de acordo com a entrada, é estimulada ou desestimulada. Caso o desempenho da rede seja satisfatório essa tendência é estimulada, ou seja, há um reforço positivo. Caso contrário, a mesma é desestimulada, ou seja, há reforço negativo (DE OLIVEIRA, 2005).

A. 6 Treinamento, validação e teste

Em redes com aprendizagem supervisionada, o treinamento consiste na apresentação de um conjunto de pares entrada/saída para o ajuste dos pesos sinápticos. Estes pesos são calculados de forma iterativa até que, ao final do treinamento, a rede seja capaz de classificar corretamente todas as entradas. Vale ressaltar que, quando se diz “corretamente”, leva-se em consideração uma faixa de tolerância.

A validação consiste na subdivisão do conjunto de treinamento em subconjuntos de estimação e validação. O treinamento, feito com o subconjunto de estimação, é interrompido periodicamente e o erro da rede em relação ao subconjunto de validação é calculado. Quando o erro do subconjunto de validação começa a crescer, mesmo com o erro de treinamento decrescendo, decide-se por interromper o treinamento. O teste é a verificação da capacidade de generalização da RNA, ou seja, a capacidade de produzir uma saída correta para uma entrada não apresentada no processo de treinamento (DE OLIVEIRA, 2005).

Uma das formas de avaliar o desempenho da rede e determinar a escolha da melhor arquitetura para a aplicação desejada, é através do cálculo de um índice de erro para os subconjuntos de validação e teste. Este índice consiste no valor da raiz quadrada do erro médio quadrático entre saída da rede e a saída desejada (e_{RMSE}), conforme a equação (32), para cada subconjunto.

$$e_{RMSE} = \frac{\sqrt{(S_D - S_R)^2}}{N_A} \quad (32)$$

onde:

S_D^2	Saída desejada da amostra i ;
S_R^2	Saída fornecida pela RNA para a amostra i ;
N_A	Número de amostras no conjunto de dados.

Outra forma de avaliação de desempenho da rede é através do cálculo do número de acertos para cada subconjunto (validação e teste). Para tanto, é calculado o desvio (e) entre a saída esperada (S_D) e a saída fornecida pela rede (S_R), para cada elemento do subconjunto, conforme a equação a seguir:

$$e = S_D - S_R \quad (33)$$

Após o cálculo do desvio, verifica-se se o mesmo supera uma tolerância pré-estabelecida, configurando, dessa forma, um erro. Caso este erro seja inferior à tolerância, o configura-se, portanto, um acerto. Dessa forma, a partir do número de acertos e do total de elementos, calcula-se o percentual de acertos para cada subconjunto. Neste trabalho, o critério adotado é o do percentual de acertos.

A. 7 Generalização do conhecimento

É desejável que uma rede neural, após sofrer treinamento, seja capaz de produzir respostas corretas a estímulos externos, mesmo que estes não sejam exatamente iguais aos estímulos utilizados no seu treinamento. Esta capacidade de generalização está relacionada aos seguintes fatores: o tamanho e a representatividade do conjunto de

treinamento em relação ao ambiente no qual a rede irá operar, a arquitetura da rede e o grau de complexidade do ambiente.

A complexidade do problema é uma característica que não se pode controlar. A partir dessa premissa, para que possa ocorrer uma boa generalização, pode-se manter fixa a arquitetura da rede e investigar o tamanho do conjunto de amostras ideal ou estabelecer um conjunto de treinamento fixo e investigar a melhor arquitetura de rede para esse conjunto (HAYKIN, 1998).

Outra questão relevante é a escolha do universo de amostras que serão apresentadas à rede neural. A parcela de amostras que serão utilizadas para treinamento deve possuir uma quantidade de dados que representem as características do problema a ser solucionado. Se essa premissa não for seguida, a rede também perde sua capacidade de generalização, especializando-se nos dados de treinamento e sendo incapaz de reconhecer estímulos externos, se for apresentado a ela um número excessivo de estímulos nesta fase.

O cuidado na determinação da quantidade de neurônios nas camadas intermediárias se deve ao fato de que se houver um número excessivo de neurônios, a rede pode se tornar tão flexível que passa a ser especialista no conjunto de treinamento, caracterizando assim uma situação denominada *overfitting*. Por outro lado, um número reduzido de neurônios levará a rede lidar com um excesso de restrições na tentativa de modelar o problema, levando muito tempo para encontrar a solução.

Apêndice B

Método da bissecção

O método da bissecção consiste em um algoritmo destinado a encontrar as raízes de uma função $f(x)$ em um dado intervalo $[x_{\min}, x_{\max}]$ (KIUSALAAS, 2005). Para tanto, o valor de x é inicialmente escolhido como o ponto central desse intervalo, ou seja:

$$x = \frac{(x_{\max} - x_{\min})}{2} \quad (34)$$

Em seguida é feita a verificação de proximidade do ponto de uma possível raiz, calculando o produto entre $f(x)$ e $f(x_{\max})$ e entre $f(x)$ e $f(x_{\min})$, e avaliando o sinal do valor do produto resultante, como mostram as inequações (35) e (36).

$$f(x).f(x_{\min}) < 0 \quad (35)$$

$$f(x).f(x_{\max}) < 0 \quad (36)$$

Se o valor obtido em (34) for menor que zero, existe uma raiz no intervalo $[x_{\min}, x]$. Analogamente, se o produto obtido em (35) for menor do que zero, existe uma raiz no intervalo $[x, x_{\max}]$. Sendo assim, após a identificação do subconjunto que contém a raiz, é retomado o processo, onde os limites passam a ser o valor de x e o valor de x_{\min} ou x_{\max} , de forma iterativa até que o critério de tolerância seja respeitado. Este critério pode ser a distância entre os extremos ou a proximidade de $f(x)$ de zero, conforme as seguintes inequações:

$$|x_{\max} - x_{\min}| \leq tol_1 \quad (37)$$

$$|f(x)| < tol_2 \quad (38)$$

onde tol_1 representa a tolerância para a distância entre os extremos do intervalo e tol_2 a proximidade de $f(x)$ de zero. A figura a seguir ilustra o processo iterativo descrito.

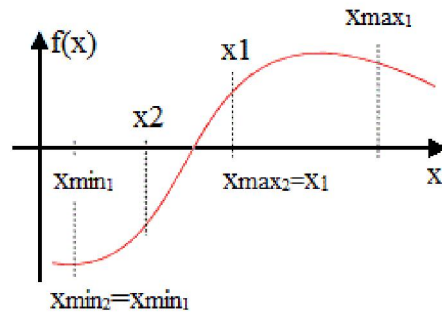


Figura 63 - Método da Bissecção

Entretanto, é importante observar as limitações do método:

- Pressuposição de que há apenas uma raiz no intervalo;
- Dificuldade de convergência para raízes nos valores coincidentes com os dos extremos;

Apêndice C

Dados dos sistemas-teste utilizados

C. 1 Dados do Sistema IEEE 14 barras

Os dados do sistema IEEE 14 barras em sua configuração original encontram-se resumidos nas tabelas a seguir:

Tabela 19 – Dados do sistema IEEE 14 barras

Barra	Tipo	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Potência ativa(MW)	Potência reativa(Mvar)
1	V θ	1.060	0.0	0.0	0.0
2	PV	1.045	-4.98	21.7	12.7
3	PV	1.010	-12.72	94.2	19.0
4	PQ	1.019	-10.33	47.8	-3.9
5	PQ	1.020	-8.78	7.6	1.6
6	PV	1.070	-14.22	11.2	7.5
7	PQ	1.062	-13.37	0.0	0.0
8	PV	1.090	-13.36	0.0	0.0
9	PQ	1.056	-14.94	29.5	16.6
10	PQ	1.051	-15.10	9.0	5.8
11	PQ	1.057	-14.79	3.5	1.8
12	PQ	1.055	-15.07	6.1	1.6
13	PQ	1.050	-15.16	13.5	5.8
14	PQ	1.036	-16.04	14.9	5.0

Tabela 20 – Dados de linha – Sistema IEEE 14 barras

De	Para	R (p.u.)	X (p.u.)	B _{SH} (p.u.)
1	2	0.01938	0.05917	0.0528
1	5	0.05403	0.22304	0.0492
2	3	0.04699	0.19797	0.0438
2	4	0.05811	0.17632	0.0340
2	5	0.05695	0.17388	0.0346
3	4	0.06701	0.17103	0.0128
4	5	0.01335	0.04211	0.0
4	7	0.0	0.20912	0.0
4	9	0.0	0.55618	0.0
5	6	0.0	0.25202	0.0
6	11	0.09498	0.19890	0.0
6	12	0.12291	0.25581	0.0
6	13	0.06615	0.13027	0.0
7	8	0.0	0.17615	0.0
7	9	0.0	0.11001	0.0
9	10	0.03181	0.08450	0.0
9	14	0.12711	0.27038	0.0

C. 2 Dados do Sistema 33 barras

Os dados do sistema 33 barras (BARAN e WU, 1989) em sua configuração original encontram-se resumidos nas tabelas a seguir:

Tabela 21 – Dados do sistema 33 barras

Barra	Tipo	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Potência ativa (kW)	Potência reativa (kvar)
1	PQ	0.9970	0.8297	100.0	60.0
2	PQ	0.9829	5.5028	90.0	40.0
3	PQ	0.9755	9.2620	120.0	80.0
4	PQ	0.9681	13.0798	60.0	30.0
5	PQ	0.9497	7.6693	60.0	20.0
6	PQ	0.9462	-5.5274	200.0	100.0
7	PQ	0.9413	-3.4607	200.0	100.0
8	PQ	0.9351	-7.6480	60.0	20.0
9	PQ	0.9292	-11.2306	60.0	20.0
10	PQ	0.9284	-10.8151	45.0	30.0
11	PQ	0.9269	-10.1566	60.0	35.0
12	PQ	0.9208	-15.3887	60.0	35.0
13	PQ	0.9185	-19.8968	120.0	80.0
14	PQ	0.9171	-22.0559	60.0	10.0
15	PQ	0.9157	-23.3882	60.0	20.0
16	PQ	0.9137	-27.8154	60.0	20.0
17	PQ	0.9131	-28.3648	90.0	40.0
18	PQ	0.9965	0.2092	90.0	40.0
19	PQ	0.9929	-3.6284	90.0	40.0
20	PQ	0.9922	-4.7375	90.0	40.0
21	PQ	0.9916	-5.9034	90.0	40.0
22	PQ	0.9794	3.7288	90.0	50.0
23	PQ	0.9727	-1.3553	420.0	200.0
24	PQ	0.9694	-3.8591	420.0	200.0
25	PQ	0.9477	9.9300	60.0	25.0
26	PQ	0.9452	13.1474	60.0	25.0
27	PQ	0.9337	17.8999	60.0	20.0
28	PQ	0.9255	22.3636	120.0	70.0
29	PQ	0.9220	28.3951	200.0	600.0
30	PQ	0.9178	23.5590	150.0	70.0
31	PQ	0.9169	22.2388	210.0	100.0
32	PQ	0.9166	21.7959	60.0	40.0
33	V θ	1	0	0	0

Tabela 22 – Dados de linha – Sistema 33 barras

De	Para	R (Ω)	X (Ω)	B _{SH} (p.u.)
33	1	0.0922	0.0470	0
1	2	0.4930	0.2511	0
2	3	0.3660	0.1864	0
3	4	0.3811	0.1941	0
4	5	0.8190	0.7070	0
5	6	0.1872	0.6188	0
6	7	0.7114	0.2351	0
7	8	1.0300	0.7400	0
8	9	1.0440	0.7400	0
9	10	0.1966	0.0650	0
10	11	0.3744	0.1238	0
11	12	1.4680	1.1550	0
12	13	0.5416	0.7129	0
13	14	0.5910	0.5260	0
14	15	0.7463	0.5450	0
15	16	1.2890	1.7210	0
16	17	0.7320	0.5740	0
1	18	0.1640	0.1565	0
18	19	1.5042	1.3554	0
19	20	0.4095	0.4784	0
20	21	0.7089	0.9373	0
2	22	0.4512	0.3083	0
22	23	0.8980	0.7091	0
23	24	0.8960	0.7011	0
5	25	0.2030	0.1034	0
25	26	0.2842	0.1447	0
26	27	1.0590	0.9337	0
27	28	0.8042	0.7006	0
28	29	0.5075	0.2585	0
29	30	0.9744	0.9630	0
30	31	0.3105	0.3619	0
31	32	0.3410	0.5302	0

C. 3 Dados do Sistema 9 barras

Os dados do sistema 9 barras (GRAINGER e LEE, 1982) em sua configuração original encontram-se resumidos nas tabelas a seguir:

Tabela 23 – Dados do sistema 9 barras

Barra	Tipo	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Potência ativa (kW)	Potência reativa (kvar)
1	PQ	0.87320	-7.5103	1640	200
2	PQ	0.89121	-6.6996	980	130
3	PQ	0.91829	-5.7376	1150	60
4	PQ	0.93500	-5.1916	780	110
5	PQ	0.94408	-4.7601	1610	600
6	PQ	0.96945	-3.4360	1598	1840
7	PQ	0.97895	-2.7565	1790	446
8	PQ	0.99167	-1.3316	980	340
9	PQ	0.99666	-0.5821	1840	460
SE(10)	V θ	1.00000	0	0	0

Tabela 24 – Dados de linha – Sistema 9 barras

De	Para	R (Ω)	X (Ω)	B _{SH} (p.u.)
1	2	5,3434	3,0246	0
2	3	4,7953	2,7160	0
3	4	2,0552	1,1640	0
4	5	0,9053	0,7886	0
5	6	1,9831	1,7276	0
6	7	0,6984	0,6084	0
7	8	0,7463	1,2050	0
8	9	0,0140	0,6051	0
9	SE(10)	0,1233	0,4127	0

Referências Bibliográficas

ABDULSALAM, S. G., XU, W., "Sequential phase energisation technique for capacitor switching transient reduction", IET Generation, Transmission & Distribution, v. 1, n. 4, p. 596–602, jul. 2007.

ALDANA, A., CESPEDES, R., PARRA, E., LOPEZ, R., RUIZ, M. E., "Implementation of smart grids in the Colombian electrical sector", IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Latin America), 19 oct. 2011

ALQUTHAMI, T., RAVINDRA, H., FARUQUE, M. O., STEURER, M., BALDWIN, T., "Study of photovoltaic integration impact on system stability using custom model of PV arrays integrated with PSS/E", North American Power Symposium (NAPS), 2010.

ASANO, H., BANDO, S., "Load fluctuation analysis of commercial and residential customers for operation planning of a hybrid photovoltaic and cogeneration system", 2006.

BARAN, M. E., WU, F. F., "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing", IEEE Transactions on Power Delivery, v. 4, n. 2, p. 1401–1407, apr. 1989.

BARONA, A., FERRANDIS, F., OLARTE, J., IRIBARREN, J. L., "New power quality solutions especially designed for industrial applications", 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, 2007.

BOGONEZ-FRANCO, P., BALCELLS, J., JUNYENT, O., JORDA, J., "SVC model for voltage control of a microgrid", 2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 27 jun. 2011.

CHEN, X., SUN, J., "A study of renewable energy system harmonic resonance based on a DG test-bed", IEEE, mar. 2011.

CHIA-NAN KO, YING-PIN CHANG, CHIA-JU WU, "A PSO Method With Nonlinear Time-Varying Evolution for Optimal Design of Harmonic Filters", IEEE Transactions on Power Systems, v. 24, n. 1, p. 437–444, feb. 2009.

CHIRADEJA, P., "Benefit of Distributed Generation: A Line Loss Reduction Analysis", Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, IEEE/PES, 2005.

CHOWDHURY, S. P., CHOWDHURY, S., TEN, C. F., CROSSLEY, P. A., "Operation and control of DG based power island in Smart Grid environment", 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution - Part 1, 8 jun. 2009.

DALOUB, L. M., "Power quality optimization and reactive power control by modeling of SVC in healthcare centre", 11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU) , 17 oct. 2011.

DENG, Y. M., REN, X. J., "Optimal capacitor switching with fuzzy load model for radial distribution systems", *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings*, v. 150, n. 2, p. 190– 194, mar. 2003.

DONSIÓN, M. P., GÜEMES, J. A., OLIVEIRA, F., "Influence of a SVC on AC Arc furnaces harmonics, flicker and unbalance measurement and analysis", *15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference.*, 26 apr. 2010.

EBRAHIMIRAD, H., CHOBDAR, A., DEHNAVI, G. R., "A new control approach for voltage quality improvement in distribution power system by means of an SVC", *4th IET Conference on Power Electronics, Machines and Drives* , 2 apr. 2008.

EL MOFTY, A., YOUSSEF, K., "Industrial power quality problems", *16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (IEE Conf. Publ. No. 482)*, 2001.

GAMA, P. H. R., FLORES, E. M., ALVAREZ, G. P., *et al.*, "Incorporating distributed generation in the energy contracting strategy in a regulated environment", *CIGRE/IEEE PES Joint Symposium*, 29 jul. 2009.

GILDONG KIM, HANMIN LEE, "Optimal Capacity of SVC to Compensate Flicker Induced by Electric Arc Furnace", *International Conference on Information and Multimedia Technology, IEEE*, 16 dec. 2009.

GOMES, P., MARTINS, A. C., ZANI, C. R., SARDINHA, S. L., "Connection requirements and Grid Codes for distributed generation", *CIGRE/IEEE PES Joint Symposium*, 29 jul. 2009.

GRAAFF, R. DE, MYRZIK, J., KLING, W., ENSLIN, J., "Series controllers in distribution systems - a survey of benefits in relation to DG", *International Conference on Future Power Systems*, 18 nov. 2005.

GRAINGER, J. J., LEE, S. H., "Capacity Release by Shunt Capacitor Placement on Distribution Feeders: A New Voltage-Dependent Model", *IEEE Power Engineering Review*, v. PER-2, n. 5, p. 42–43, may 1982.

HAMIDI, V., SMITH, K. S., "Smart grid technologies for connection of offshore windfarms", *IET Conference on Renewable Power Generation* , 6 sep. 2011.

HAMIDI, V., SMITH, K. S., WILSON, R. C., "Smart Grid technology review within the Transmission and Distribution sector", *Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe)*, IEEE/PES, 11 oct. 2010.

HAYKIN, S. "Neural Networks: A Comprehensive Foundation", 2. ed., Prentice Hall, 1998.

HILDRETH, J. G., GILLIES, D. A., PERKINS, S. C., "Hazard Assessment of Transient Step and Touch Potentials Caused by Shunt Capacitor Switching", *IEEE*, jun. 2007.

HYONG SIK KIM, LU, D. D.-C., "Review on wind turbine generators and power electronic converters with the grid-connection issues", 20th Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 5 dec. 2010.

JAHDI, S., LEI LAI, L., NANKOO, D., "Grid integration of wind-solar hybrid renewables using AC/DC converters as DG power sources", World Congress on Sustainable Technologies (WCST). IEEE, 7 nov. 2011.

JIN QIANG, ZHANG SHUO, YONG-LI, LI., "A study on capacity of distributed generation and its effect on short circuit current at micro-grid operation mode", 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 6 jul. 2011.

KATIRA, M. J., PORATE, K. B., "Computer Simulation of 132 / 11 KV Distribution Substation Using Static Var Compensator (SVC) for Voltage Enhancement - A Case Study", 2nd International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology (ICETET), IEEE, 16 dec. 2009.

KIUSALAAS, J., "Numerical Methods in Engineering with MATLAB®", Cambridge University Press, 2005.

KULKARNI, D. B., UDUPI, G. R., "ANN-Based SVC Switching at Distribution Level for Minimal-Injected Harmonics", IEEE Transactions on Power Delivery, v. 25, n. 3, p. 1978–1985, jul. 2010.

LASSETER, R. H., PAIGI, P., "Microgrid: a conceptual solution", IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, 20 jun. 2004.

MARTINEZ, J., RAMOS, G., "Reactive power and harmonic distortion control in electric traction systems", Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T&D-LA), IEEE/PES, 8 nov. 2010.

MOK, Y. K., NORMAN, C. F., LAU, W. H., LEUNG, M. C., "Experiment-based simulation for distortion behavior in LV networks for microgrid modeling", IEEE Power and Energy Society General Meeting, 24 jul. 2011.

MOLINA, M. G., SANTOS, E. C. DOS, PACAS, M., "Improved power conditioning system for grid integration of photovoltaic solar energy conversion systems", Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T&D-LA), IEEE/PES, 8 nov. 2010.

MOSHARI, A., YOUSEFI, G. R., EBRAHIMI, A., HAGHBIN, S., "Demand-side behavior in the smart grid environment", Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), IEEE , 11 oct. 2010.

NARIMANI, M., VARMA, R. K., "Application of Static Var Compensator (SVC) with fuzzy controller for grid integration of wind farm", 23rd Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE) , 2 may 2010.

NIQUINI, F. M. M., VARIZ, A. M., PEREIRA, J. L. R., BARBOSA, P. G. and CARNEIRO Jr., S., "Frequency Domain Modeling of Monopolar HVDC Link Using Three-Phase Harmonic Current Injection Method", IEEE PES T&D Conference and Exposition Latin-America, Bogota, Colombia, Aug. 2008.

NIQUINI, F. M. M., "Modelagem do Elo de Corrente Contínua para Análise Harmônica Utilizando o Método de Injeção de Correntes Trifásico Harmônico com Solução Iterativa", Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Juiz de Fora, 2009.

OLIVEIRA, A. R. DE., "Redes Neurais Artificiais Aplicadas na Detecção, Classificação e Localização de Defeitos em Linhas de Transmissão", Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Juiz de Fora, 2005.

OLIVEIRA, L. W., "Reconfiguração e Alocação Ótima de Capacitores em Sistemas de Distribuição", Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.

PARANHOS, I., LIBANO, F., MELCHORS, J., MANO, O., ROENICK, A., "Power energy meter in a low cost hardware/software", European Conference on Power Electronics and Applications, 2 sep. 2007.

QIANG SUN, JIANZHONG WU, YIBIN ZHANG, JENKINS, N., EKANAYAKE, J., "Comparison of the development of Smart Grids in China and the United Kingdom", Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), IEEE/PES, 11 oct. 2010.

SALOR, O., GULTEKIN, B., BUHAN, S., *et al.*, "Electrical Power Quality of Iron and Steel Industry in Turkey", IEEE Transactions on Industry Applications, v. 46, n. 1, p. 60–80, feb. 2010.

SANTOS, A. H. M., SIMÕES, A. A., MARTINS, A. R., *et al.*, "Conservação de Energia: Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos", 3. ed. Itajubá: Editora da Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 2001.

SHAOMING LI, HUI WANG, PING JI, "An improved double peak interpolation algorithm based on the dynamic harmonics and its application in harmonic power metering", International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCSM), 22 oct. 2010.

SHU-TING TSENG, JIANN-FUH CHEN, "Single-DC Reactor-Type Transient Limiter for Reducing Three-Phase Power Capacitor Switching Transients", IEEE Transactions on Power Electronics, v. 27, n. 4, p. 1745–1757, apr. 2012.

SHU-TING TSENG, JIANN-FUH CHEN, TSORNG-JUU LIANG, "Symmetrical Structure Transient Limiter for Suppression of Capacitor Switching Transients", IEEE Transactions on Power Delivery, v. 26, n. 4, p. 2821–2828, oct. 2011.

SINHA, A., NEOGI, S., LAHIRI, R. N., *et al.*, "Smart grid initiative for power distribution utility in India", IEEE Power and Energy Society General Meeting, 24 jul. 2011.

SRINIVASAN, D., "Forecasting daily load curves using a hybrid fuzzy-neural approach", IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, v. 141, n. 6, p. 561, 1994.

USUKI, K., AOYAMA, F., HANAMATSU, M., "Development of SVC control for suppressing voltage fluctuations", 8th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE & ECCE), IEEE, 30 jun. 2011.

VARIZ, A. M., "Cálculo do Fluxo de Harmônicas em Sistemas Trifásicos Utilizando o Método de Injeção de Correntes", Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.

VARIZ, A.M., PEREIRA, J.L.R., CARNEIRO Jr., S., BARBOSA, P.G., "Three-Phase Harmonic Power Flow Using the Current Injection Method", IEEE 12th International Conference on Harmonics and Power Quality (ICHQP), Cascais, Portugal, 2006.

VARIZ, A.M., PEREIRA, J.L.R., CARNEIRO Jr., S. and BARBOSA, P.G., "Harmonic Analysis of the Power Distribution Neutral-to-Earth Voltage (NEV) Test Case using Four-Wire Three-Phase Harmonic Current Injection Method", IEEE PES General Meeting, Calgary, Canada, 2009.

WANG, F., DUARTE, J. L., HENDRIX, M. A. M., RIBEIRO, P. F., Modeling and Analysis of Grid Harmonic Distortion Impact of Aggregated DG Inverters", IEEE Transactions on Power Electronics, v. 26, n. 3, p. 786–797, mar. 2011.

XU WEI, ZHOU YU-HUI, ZHU JIE-LIN, "Energy-efficient distribution in smart grid", International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, IEEE, 6 apr. 2009.

YONGHUA CHENG, "Test platform of smart grids with renewable energy systems and plug-in hybrid electric vehicles", 14th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2011), 30 sep. 2011.

ZENG MING, TIAN KUO, CHEN, LI, NA, LI, "Method of Capacity Compensation for Independent Distributed Generation in Distribution Network within the Context of Smart Grid", Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2010 Asia-Pacific, 28 mar. 2010.

ZHE CHEN, GUERRERO, J. M., BLAABJERG, F., "A Review of the State of the Art of Power Electronics for Wind Turbines", IEEE Transactions on Power Electronics, v. 24, n. 8, p. 1859–1875, aug. 2009.