



Universidade Federal do Piauí
Centro de Ciências da Natureza
Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação

**Estudo e Desenvolvimento de uma Abordagem
para a Determinação da Sequência de Ajustes
no Controle da Magnitude de Tensão em
Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica
Considerando Aspectos da Infraestrutura de
Comunicação de Dados**

Thiago Allisson Ribeiro da Silva

**Número de Ordem PPGCC: M001
Teresina-PI, 29 de fevereiro de 2016**

Thiago Allisson Ribeiro da Silva

**Estudo e Desenvolvimento de uma Abordagem para a
Determinação da Sequência de Ajustes no Controle da
Magnitude de Tensão em Sistemas de Transmissão de
Energia Elétrica Considerando Aspectos da Infraestrutura
de Comunicação de Dados**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da UFPI (área de concentração: Sistemas de Computação), como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Ciência da Computação.

Universidade Federal do Piauí – UFPI

Centro de Ciências da Natureza

Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação

Orientador: Ricardo de Andrade Lira Rabêlo

Coorientador: Guilherme Guimarães Lage

Teresina-PI

29 de fevereiro de 2016

Thiago Allisson Ribeiro da Silva

Estudo e Desenvolvimento de uma Abordagem para a Determinação da Sequência de Ajustes no Controle da Magnitude de Tensão em Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica Considerando Aspectos da Infraestrutura de Comunicação de Dados/ Thiago Allisson Ribeiro da Silva. – Teresina-PI, 29 de fevereiro de 2016-89 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Ricardo de Andrade Lira Rabêlo

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Piauí – UFPI
Centro de Ciências da Natureza

Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, 29 de fevereiro de 2016.

1. Controle de magnitude de tensão. 2. Análise de sensibilidade. 3. Despacho de potência reativa. 4. Infraestrutura de comunicação. 5. Análise de Disponibilidade. I. Ricardo de Andrade Lira Rabêlo. II. Universidade Federal do Piauí. III. Departamento de Estatística e Computação. IV. Uma Abordagem para o Controle da Magnitude de Tensão Aplicada a Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica

CDU 02:141:005.7

Thiago Allisson Ribeiro da Silva

Estudo e Desenvolvimento de uma Abordagem para a Determinação da Sequência de Ajustes no Controle da Magnitude de Tensão em Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica Considerando Aspectos da Infraestrutura de Comunicação de Dados

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da UFPI (área de concentração: Sistemas de Computação), como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Ciência da Computação.

Trabalho aprovado. Teresina-PI, 29 de fevereiro de 2016:

**Prof. Dr. Ricardo de Andrade Lira
Rabêlo**
Orientador

Prof. Dr. Vinicius Ponte Machado
Docente Interno ao Programa

**Prof. Dr. Bartolomeu Ferreira dos
Santos Junior**
Docente Externo ao Programa

**Prof. Dr. José Valdemir dos Reis
Junior**
Docente Externo ao Programa

**Prof. Dr. Geraldo Roberto Martins da
Costa**
Docente Externo à Instituição

Teresina-PI
29 de fevereiro de 2016

*Aos meus pais José e Francisca, e aos meus irmãos,
Márcia e Marcos, por todo o apoio, carinho e dedicação.*

Agradecimentos

Agradeço a Deus por ter guiado meus passos nesta caminhada.

Agradeço aos meus pais, José e Francisca, e aos meus irmãos, Márcia e Marcos, por todo o apoio, compreensão e ajuda nesta jornada de dois anos.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Ricardo Lira, por todos os ensinamentos, pela dedicação, confiança e pelas oportunidades que ele me concedeu durante esse período.

Agradeço ao meu coorientador, Prof. Guilherme Lage, por aceitar o desafio de me orientar e pelo capricho na condução do trabalho.

Agradeço aos professores Daniel Barbosa e Ricardo Augusto, por todo o apoio e por terem me auxiliado na realização deste trabalho

Agradeço aos meus amigos Jefferson Henrique, Pedro Almir, Matheus Campanhã, José Valdemir, Jaclason Machado e José Vigno, por estarem presentes comigo nesta jornada e por todo o auxílio para a realização deste trabalho.

Agradeço aos amigos de mestrado, pela possibilidade de estar com eles este período, pelos momentos de estudo e descontração.

Agradeço aos professores do PPGCC, por me possibilitarem uma formação sólida e de excelência.

Agradeço à CAPES pelo apoio financeiro para realização deste trabalho de pesquisa.

*“O talento vence jogos,
mas só o trabalho em equipe ganha campeonatos.”
(Michael Jordan)*

Resumo

O controle da magnitude de tensão é uma tarefa fundamental para a operação do sistema de transmissão de energia elétrica, sendo aplicado à manutenção das magnitudes de tensão dentro de limites pré-determinados definidos por órgãos de regulamentação. Para execução do controle da magnitude de tensão são necessárias informações relacionadas ao estado do sistema e quais dispositivos de controle podem ser ajustados para levar o sistema à operação adequada. Aplica-se ainda tecnologias de tráfego de dados que viabilizem a interação entre os dispositivos de controle e a execução das ações determinadas pelos operadores do sistema. Este trabalho propõe o estudo e o desenvolvimento de uma abordagem para a determinação da sequência de ajustes no controle da magnitude de tensão em sistemas de transmissão de energia elétrica considerando aspectos da infraestrutura de comunicação de dados. Essa abordagem é constituída por três componentes. O primeiro componente, aqui denominado Gestor de Controle, é responsável por determinar a sequência dos ajustes nas injeções de potência reativa para corrigir as tensões nas barras de carga cujas magnitudes estejam fora dos limites adequados. Tais ajustes são determinados em função de duas metodologias de análise de sensibilidade baseadas na matriz Jacobiana reduzida (J_{QV}) das equações de balanço de potência do sistema, a qual relaciona variações da injeção de potência reativa com variações nas magnitudes de tensão nas barras do sistema. O segundo componente consiste nos Nós de Controle, responsável por receber os comandos definidos pelo Gestor de Controle e efetuar os ajustes recomendados. O terceiro componente consiste na Infraestrutura de Comunicação, responsável pela transmissão dos dados que caracterizam o estado do sistema e os comandos a serem executados pelos Nós de Controle. Simulações computacionais nos sistemas IEEE de 14 e 57 barras são realizadas para avaliar o funcionamento da abordagem proposta considerando cenários operacionais com violações de tensão. As simulações fazem uso da ferramenta NS-3 (*Network Simulator 3*) de modo a representar os elementos da infraestrutura de comunicação e obter métricas relativas ao tráfego de dados, computando a disponibilidade média das redes WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) e DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*), com o objetivo de verificar as diferenças entre um meio cabeado e um sem fio no fornecimento do serviço de transmissão de dados. Os resultados obtidos fornecem o despacho de potência reativa necessário para a correção das violações de tensão, os perfis de tensão nas barras e as perdas de potência ativa no sistema à medida que os ajustes são realizados e o tráfego de dados associados aos comandos de regulação.

Palavras-chave: análise de sensibilidade, controle da magnitude de tensão, disponibilidade média da rede, fluxo de carga, infraestrutura de comunicação.

Abstract

Voltage magnitude control is an essential task for the operation of power transmission systems, being applied to keep voltage magnitudes within predetermined limits defined by regulatory agencies. To perform such a control, information regarding the current operating point and which control devices may be adjusted to take the system to an adequate operating point is required. It also applies data traffic technologies that enable the interaction between control devices and the execution of actions determined by system operators. This work proposes the study and development of an approach to determine the sequence of adjustments in voltage magnitude control considering aspects of data communication infrastructure. This approach consists of three components. The first component, the Control Manager, is responsible for determining the sequence of adjustments in the injections of reactive power to correct voltage violations on load buses whose magnitudes are out of the adequate limits. Such adjustments are determined based on two different sensitivity analyses by means of the reduced Jacobian matrix (J_{QV}) of the system power balance equations, which relates variations of reactive power injections with variations in voltage magnitudes. The second component consists in the Control Nodes, responsible for receiving commands defined by the Control Manager and do the recommended adjustments. The third component consist in the Communication Infrastructure, which is responsible for transmitting the data that characterize the current operating point and the commands to be executed by Control Nodes. Computational simulations have been carried out for the IEEE 14 and 57-bus systems to assess the effectiveness of the proposed approaches considering operational scenarios with voltage magnitude violations. These simulations make use of the NS-3 (*Network Simulator 3*) tool to represent the communications infrastructure elements and obtain metrics for data traffic, computing the average availability of WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) and DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) networks, in order to verify the differences between a wired and a wireless medium in providing data transmission service. The obtained results provide the reactive power dispatch to correct voltage magnitude violations, voltage profiles and active power losses as the recommended adjustments are executed and data traffic associated with regulation commands.

Keywords: average network availability, communication infrastructure, load flow, sensitivity analysis, voltage magnitude control.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Descrição dos componentes da abordagem.	23
Figura 2 – Faixas adequada e de controle (CALDERARO et al., 2015)	24
Figura 3 – Estrutura de um NC.	30
Figura 4 – Sistema de 14 barras.	32
Figura 5 – Geração de Potência Reativa da metodologia MaxQ para o CT-1	39
Figura 6 – Geração de Potência Reativa da metodologia VSF para o CT-1	44
Figura 7 – Perdas de Potência Ativa por Metodologia para o CT-1	45
Figura 8 – Sistema de 57 barras.	46
Figura 9 – Geração de Potência Reativa da metodologia MaxQ para o CT-2.	48
Figura 10 – Geração de Potência Reativa para a VSF para o CT-2	50
Figura 11 – Perdas de Potência Ativa por Metodologia para o CT-2.	50
Figura 12 – Atraso para a execução dos ajustes de controle da metodologia MaxQ no CT-1	53
Figura 13 – Volume de dados para a execução dos ajustes de controle da metodologia MaxQ no CT-1	54
Figura 14 – Atraso para a execução dos ajustes de controle da metodologia VSF no CT-1	54
Figura 15 – Volume de dados para execução dos ajustes de controle da metodologia VSF no CT-1	55
Figura 16 – Volume de Dados de controle para a MaxQ.	56
Figura 17 – Disponibilidade WiMAX para execução dos cenários de teste.	58
Figura 18 – Disponibilidade DWDM para execução dos cenários de teste	59
Figura 19 – Volume de dados para a execução dos ajustes de controle da metodologia VSF no CT-2	89

Lista de tabelas

Tabela 1 – Dados do CT-1	33
Tabela 2 – Limites de Geração de Potência Reativa para o Sistema de 14 Barras .	33
Tabela 3 – Ponto de Operação após a Resolução do Fluxo de Carga para o CT-1 (Caso Base)	34
Tabela 4 – Variação da Injeção de Potência Reativa na Iteração 1 da Metodologia MaxQ para O CT-1	34
Tabela 5 – Ponto de Operação do CT-1 após Iteração 1 da Metodologia MaxQ . .	35
Tabela 6 – Variação de Injeção de Potência Reativa na Iteração 2 da Metodologia MaxQ para o CT-1	36
Tabela 7 – Ponto de Operação do CT-1 após Iteração 2 da Metodologia MaxQ . .	36
Tabela 8 – Variação de Injeção de Potência Reativa na Iteração 3 da Metodologia MaxQ	37
Tabela 9 – Ponto de Operação do CT-1 após Iteração 3 da Metodologia MaxQ . .	37
Tabela 10 – Variação de Injeção de Potência Reativa na Iteração 4 da Metodologia MaxQ	38
Tabela 11 – Ponto de Operação do CT-1 após Iteração 4 da Metodologia MaxQ . .	38
Tabela 12 – Índices de Sensibilidade na Iteração 1 da Metodologia VSF	40
Tabela 13 – Ponto de Operação do CT-1 após Iteração 1 da Metodologia VSF . . .	40
Tabela 14 – Índices de Sensibilidade na Iteração 2 da Metodologia VSF	41
Tabela 15 – Ponto de Operação do CT-1 após Iteração 2 da Metodologia VSF . . .	41
Tabela 16 – Índices de Sensibilidade na Iteração 3 da Metodologia VSF	42
Tabela 17 – Ponto de Operação do CT-1 após Iteração 3 da Metodologia VSF . . .	42
Tabela 18 – Índices de Sensibilidade na Iteração 4 da Metodologia VSF para o CT-1	43
Tabela 19 – Ponto de Operação do CT-1 após Iteração 4 da Metodologia VSF para o CT-1	44
Tabela 20 – Violações da magnitude de tensão no CT-2	46
Tabela 21 – Limites de Geração de Potência Reativa para o Sistema de 57 Barras .	46
Tabela 22 – Variação de Injeção de Potência Reativa pela Metodologia MaxQ para o CT-2	47
Tabela 23 – Evolução das Magnitudes de Tensão nas Barras de Controle Determinadas pela Metodologia MaxQ para o CT-2	47
Tabela 24 – Tempo em <i>ms</i> para Execução dos Ajustes de Controle Determinados pela Metodologia MaxQ para o CT-2	48
Tabela 25 – Estado das Barras de Carga Após a Execução dos Ajustes pela Metodologia MaxQ para o CT-2	48
Tabela 26 – Índices de Sensibilidade da Metodologia VSF para o CT-2	49

Tabela 27 – Evolução das Magnitudes de Tensão nas Barras de Controle Determinadas pela Metodologia VSF para o CT-2	49
Tabela 28 – Tempo em <i>ms</i> para Execução dos Ajustes de Controle Determinados pela Metodologia VSF para o CT-2	49
Tabela 29 – Estado das Barras de Carga Após a Execução dos Ajustes pela Metodologia VSF para o CT-2	49
Tabela 30 – Parâmetros aplicados ao WiMAX.	51
Tabela 31 – Parâmetros aplicados à rede DWDM (MILETIC, 2015).	52
Tabela 32 – Tempos mínimo e máximo (em <i>ms</i>) para execução da MaxQ na rede WiMAX.	55
Tabela 33 – Tempos mínimo e máximo (em <i>ms</i>) para execução da MaxQ na rede DWDM.	55
Tabela 34 – Descrição das aplicações empregadas para análise de disponibilidade.	57
Tabela 35 – Descrição das fluxos.	57
Tabela 36 – Configuração da rede WiMAX para o sistema de 14 barras	71
Tabela 37 – Configuração da rede WiMAX para o sistema de 14 barras	73
Tabela 38 – Configuração da rede WiMAX para o sistema de 57 barras	75
Tabela 39 – Configuração da rede DWDM para o sistema de 57 barras	79
Tabela 40 – Ponto de Operação Completo CT-2.	83
Tabela 41 – Ponto de Operação Final CT-2 após execução dos ajustes de controle da metodologia MaxQ	85
Tabela 42 – Ponto de Operação Final do CT-2 após execução dos ajustes de controle da metodologia VSF	87
Tabela 43 – Tempos mínimo e máximo para execução da VSF na rede WiMAX	89
Tabela 44 – Tempos mínimo e máximo para execução da VSF na rede DWDM	89

Lista de abreviaturas e siglas

AVD	Análise do Atraso e Volume de Dados
BS	<i>Base Station</i>
CPS	<i>Common-Part Sublayer</i>
CS	<i>Convergence Sublayer</i>
DGI	<i>Distributed Grid Intelligence</i>
DL	<i>Downlink</i>
DWDM	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i>
FACTS	<i>Flexible Alternating Current Transmission System</i>
FDD	<i>Frequency Division Duplex</i>
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
FiWi	<i>Fiber-Wireless</i>
FPO	Fluxo de Potência Ótimo
FREEDM	<i>Future Renewable Electric Energy Delivery and Management</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
HVDC	<i>High Voltage Direct Current</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>
MLPS	<i>Multiprotocol Label Switching</i>
MSTP	<i>Multiple Spanning Tree Protocol</i>
MSV	<i>Minimum Singular Value</i>
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i>
NS-3	<i>Network Simulator 3</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>

OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
OTN	Rede de Transporte Óptico
OXC	<i>Optical Cross-Connect</i>
PMP	Ponto Multiponto
PON	<i>Passive Optical Network</i>
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RTDS	<i>Real Time Digital Power System</i>
SS	<i>Subscriber Station</i>
SG-BWA	<i>Study Group on Broadband Wireless Access</i>
TDD	<i>Time Division Duplex</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
THYME	<i>Toolkit for Hybrid Systems Modeling & Evaluation</i>
TVN	<i>Tangent Vector Norm</i>
VCPI	<i>Voltage Collapse Proximity Indicator</i>
VSC-OPF	<i>Voltage Stability Constrained Optimal Power Flow</i>
WG	<i>Working Group</i>
WiFi	<i>Wireless Fidelity</i>
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>
W-HUMAN	<i>Wireless High-Speed Unlicensed Metropolitan Area Network</i>
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>
WR	Wavelength-routing

Lista de símbolos

A. Conjuntos

Ω_k	Conjunto das barras vizinhas à barra k ;
$\Omega_{l,n}$	Conjunto de dispositivos de comunicação que conectam os nós l e n ;
PQ	Conjunto das barras de carga;
PV	Conjunto das barras de geração;
$V\theta$	Conjunto das barras <i>slack</i> ;
G	Conjunto das barras de controle ($PV \cup V\theta$);
ρ	Subconjunto das barras de controle ($\rho \subseteq G$) escolhidas para corrigir as violações de tensão;
\mathcal{N}	Conjunto de nós para comunicação de dados presentes na rede;

B. Índices

k	Índice das barras do sistema;
m	Índice das barras vizinhas à barra k ;
p	Índice correspondente ao pacote;
i	Índice correspondente a uma barra de carga do sistema ($1 \leq i \leq N_{PQ}$);
j	Índice correspondente a uma barra de controle do sistema ($1 \leq j \leq N_G$);
z	Índice correspondente a uma estação base;

C. Dimensões

N	Número total de barras;
N_{PV}	Número de barras PV ;
N_{PQ}	Número de barras PQ ;
N_G	Número de barras de controle;
N_ρ	Número das barras de controle a operar no sistema;

D. Parâmetros e Variáveis

P_k	Potencia ativa líquida injetada na barra k ;
P_{Ck}	Potência ativa consumida na barra k ;
P_{gk}	Potência ativa gerada na barra k ;
Q_k	Potência reativa líquida injetada na barra k ;
Q_{Ck}	Potência reativa consumida na barra k ;
Q_{gk}	Potência reativa gerada na barra k ;
Q_j^{min}	Geração de potência reativa mínima;
Q_j^{max}	Geração de potência reativa máxima;
t_{km}^{min}	Tap mínimo;
t_{km}^{max}	Tap máximo;
θ_k	Ângulo de fase da tensão na barra k ;
V_k	Magnitude de tensão da barra k ;
V^{min}	Magnitude de tensão mínima para a operação adequada;
V^{max}	Magnitude de tensão máxima para a operação adequada;
b_k^{sh}	Susceptância do elemento em derivação (<i>shunt</i>) da barra k ;
b_{km}	Susceptância série do ramo $k-m$;
b_{km}^{sh}	Susceptância <i>shunt</i> do ramo $k-m$;
g_{km}	Condutância série do ramo $k-m$;
P_{km}	Fluxo de potência ativa no ramo $k-m$;
Q_{km}	Fluxo de potência reativa no ramo $k-m$;
Q_k^{sh}	Injeção de potência reativa na barra k pelo elemento <i>shunt</i> ;
t_{km}	Tap do transformador em-fase associado ao ramo $k-m$;
θ_{km}	Abertura angular entre as fases das barras k e m , calculado como $\theta_k - \theta_m$;
φ_{km}	Ângulo de defasagem do transformador defasador associado ao ramo $k-m$;
J_{QV}	Matriz Jacobiana reduzida J_{QV} ;

C	Vetor de ponderação aplicado pela metodologia Mix;
$\Delta P(\theta, V)$	Desvio entre o nível de potência ativa estimado pelo fluxo de carga e o injetado no sistema;
ΔQ_j	Variação na geração de potência reativa das barras de controle;
$\Delta Q(\theta, V)$	Desvio entre o nível de potência reativa estimado pelo fluxo de carga e o injetado no sistema;
$\Delta Q'_j$	Vetor de variação na geração de potência reativa estabelecida pela metodologia Mix;
$\Delta\theta$	Vetor de atualização dos ângulos de fase;
ΔV	Vetor de atualização das magnitudes de tensão;
ΔV_i	Desvio de tensão das barras de carga;
p_{km}^{perdas}	Perda de potência ativa no ramo $k-m$;
S	Inversa da matriz J_{QV} contendo os índices de sensibilidade;
$A_{w,z,c}^{wi,wi}$	Disponibilidade entre os nós w e z sob um tráfego sem fio de classe c ;
$B(\rho)$	Probabilidade de bloqueio;
$B(\sigma_{wi}^w)$	Probabilidade de bloqueio na porta de saída da SS;
$B(\sigma^{op,u})$	Probabilidade de bloqueio <i>upstream</i> na porta óptica;
$B(\sigma^{op,d})$	Probabilidade de bloqueio <i>downstream</i> na porta óptica;
$\delta_{o,z}^{wi}$	Taxa de tráfego óptico permitido a ser re-roteado para o domínio sem fio, em caso de falha óptica;
λ	Comprimento de onda;
\bar{L}_c	Tamanho médio de pacote por classe;
Q_{fw}	Tamanho da fila de um dispositivo WiMAX;
$R_{w,n'}^{wi}$	Taxa de tráfego de classe c destinada para n' a partir de um SS w ;
σ	Intensidade de tráfego em uma porta de saída;
σ_w^{wi}	Intensidade de tráfego sem fio de w ;
$\sigma^{op,d}$	Intensidade de tráfego <i>dowstream</i> de uma porta óptica;

$\sigma^{op,u}$	Intensidade de tráfego <i>upstream</i> de uma porta óptica;
σ_{wi}^w	Intensidade de tráfego de uma interface WiMAX;
T	Valor total do atraso fim-a-fim;
T_n^r	Tempo de processamento do nó de comutação n ;
T_n^q	Tempo de enfileiramento do nó de comutação n ;
T_n^t	Tempo de transmissão do nó de comutação n ;
T_n^f	Tempo de propagação do nó de comutação n .

Sumário

	Introdução	1
1	REFERENCIAL TEÓRICO	7
1.1	O Problema de Fluxo de Carga	7
1.2	Controle da Magnitude de Tensão	9
1.3	Infraestrutura de Comunicação	11
1.3.1	WiMAX	12
1.3.2	Análise de Disponibilidade da Rede	14
1.4	Trabalhos Relacionados	18
1.4.1	Controle da Magnitude de Tensão	18
1.4.2	Infraestrutura de Comunicação	19
1.5	Considerações Finais	21
2	ABORDAGEM PROPOSTA PARA O CONTROLE DA MAGNITUDE DE TENSÃO	23
2.1	Componentes da Abordagem	23
2.2	Gestor de Controle	24
2.2.1	Definição das Metodologias de Controle	25
2.3	Nós de Controle	29
2.4	Infraestrutura de Comunicação	30
2.5	Considerações Finais	30
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
3.1	Considerações Iniciais	31
3.2	Descrição dos Cenários de Teste	32
3.2.1	Cenário de Teste 1 (CT-1)	32
3.2.1.1	Correção do CT-1 pela Metodologia MaxQ	34
3.2.1.2	Correção do CT-1 pela metodologia VSF	39
3.2.1.3	Perdas de Potência Ativa para o CT-1	44
3.2.2	Cenário de Teste 2 (CT-2)	45
3.2.2.1	Correção do CT-2 pela metodologia MaxQ	47
3.2.2.2	Correção do CT-2 pela metodologia VSF	48
3.2.2.3	Perdas de Potência Ativa CT-2	50
3.3	Análise da Rede de Dados	50
3.3.1	Parametrização da Rede de Dados	51
3.3.2	Atraso e Volume de Dados (AVD)	52

3.3.2.1	Análise do CT-1 para a metodologia MaxQ	52
3.3.2.2	Análise do CT-1 para a metodologia VSF	53
3.3.2.3	Análise do CT-2 para a metodologia MaxQ	55
3.3.3	Análise de Disponibilidade Média	56
3.3.3.1	Análise WiMAX	57
3.3.3.2	Análise DWDM	58
3.4	Considerações Finais	59
4	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	61
4.1	Limitações	62
4.2	Trabalhos Futuros	63
	Referências	65
	APÊNDICES	69
	APÊNDICE A – CONFIGURAÇÃO DA REDE WIMAX PARA O SISTEMA DE 14 BARRAS	71
	APÊNDICE B – CONFIGURAÇÃO DA REDE DWDM PARA O SISTEMA DE 14 BARRAS	73
	APÊNDICE C – CONFIGURAÇÃO DA REDE WIMAX PARA O SISTEMA DE 57 BARRAS	75
	APÊNDICE D – CONFIGURAÇÃO DA REDE DWDM PARA O SISTEMA DE 57 BARRAS	79
	APÊNDICE E – PONTO DE OPERAÇÃO INICIAL CT-2	83
	APÊNDICE F – PONTO DE OPERAÇÃO DO CT-2 APÓS EXECUÇÃO DOS AJUSTES DE CONTROLE DA METODOLOGIA MAXQ	85
	APÊNDICE G – PONTO DE OPERAÇÃO DO CT-2 APÓS EXECUÇÃO DOS AJUSTES DE CONTROLE DA METODOLOGIA VSF	87
	APÊNDICE H – DADOS DA ANÁLISE AVD DO CT-2 PARA A METODOLOGIA VSF	89

Introdução

Um sistema elétrico de potência consiste, na sua concepção mais básica e tradicional, na união dos sistemas de geração, transmissão e distribuição (GUNGOR; LAMBERT, 2006). O sistema de geração realiza a conversão de energia, em uma das suas formas naturalmente disponíveis, para a forma de energia elétrica. O sistema de geração é composto por usinas hidrelétricas, termoelétricas, eólicas, centrais fotovoltaicas etc. Por sua vez, o sistema de transmissão é responsável por interconectar as centrais de geração aos centros de consumo, devendo ser operado de forma a suportar quaisquer mudanças nos perfis de geração e de carga. Por fim, o sistema de distribuição consiste no ponto final de um sistema elétrico de potência, entregando a energia elétrica a residências, escritórios, estabelecimentos comerciais, pequenas indústrias e outros (MOMOH, 2012).¹

Nos sistemas de transmissão de energia elétrica, o controle da magnitude de tensão possui um papel fundamental para a sua operação segura, dado que um despacho inadequado de potência reativa pode produzir efeitos negativos nesses sistemas como, por exemplo, grandes desvios nos perfis de tensão e/ou aumento nas perdas de potência ativa (JEONG et al., 2013). Nessas situações, o sistema elétrico pode ser levado a operar próximo a condições críticas, que podem levá-lo ao colapso se ações de controle não forem tomadas (KUNDUR et al., 2004; ZABAIUO; DESSAINT; KAMWA, 2014). Para evitar tais cenários, os operadores do sistema possuem a sua disposição dispositivos de controle como: geradores síncronos, transformadores em fase, bancos de capacitores e reatores em derivação (*shunt*), FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission System*) etc. (ROBITZKY et al., 2015).

Em condições normais, a operação segura do sistema de transmissão pode ser garantida com o controle da magnitude de tensão (LOIA; VACCARO; VAISAKH, 2013) e, para isso, torna-se fundamental a aplicação de tecnologias de tráfego de dados que viabilizem a interação entre os dispositivos de controle e que garantam a execução das ações de controle determinadas pelos operadores do sistema (BARI et al., 2014; STRASSER; SIANO; VYATKIN, 2015). Tal infraestrutura de comunicação deve atuar no sensoreamento, monitoramento e transmissão de informações sobre o estado do sistema (LOIA; VACCARO; VAISAKH, 2013), que podem ser usadas na definição de comandos de controle como injetar ou absorver potência reativa nas barras de geração, uma vez que o redespacho de potência reativa, em muitas situações, é capaz de levar as magnitudes de tensão violadas nas barras de carga à faixa de operação adequada (ZHANG et al., 2014).

¹ Alguns tipos de consumidores, em função de sua demanda, podem ser atendidos em níveis de tensão correspondentes aos do sistema de subtransmissão.

Definição do Problema

De acordo com [Eremia e Shahidehpour \(2013\)](#), o objetivo principal do controle da magnitude de tensão é manter as magnitudes numa faixa de valores adequada. Para isso, o sistema elétrico de potência possui um conjunto de dispositivos de controle ([CAPITANESCU; BILIBIN; RAMOS, 2014](#)) que precisam ser operados de forma coordenada a fim de que sua atuação conjunta garanta valores adequados de tensão em todas as barras do sistema ([PARAMASIVAM et al., 2015](#)).

Dessa forma, o problema do controle da magnitude de tensão, baseado no redespacho de potência reativa, consiste na definição dos ajustes que devem ser executados nos geradores síncronos para levar as tensões das barras de carga cujas magnitudes estejam violadas para dentro da faixa de valores adequada. Para realizar essa tarefa é necessária uma infraestrutura de comunicação capaz de conectar os dispositivos de controle, viabilizando a sua coordenação e permitindo a transmissão de mensagens que informam a quantidade de potência reativa a ser injetada no sistema.

Visão Geral da Proposta

Este trabalho apresenta uma abordagem para o controle da magnitude de tensão em sistemas de transmissão de energia elétrica. A abordagem proposta é constituída por três componentes e determina uma sequência de ajustes nos geradores síncronos, no sentido de injetar potência reativa no sistema de transmissão para se alcançar um ponto de operação sem violações nas magnitudes de tensão nas barras de carga. Todos os procedimentos executados são suportados por uma rede de dados, a qual transmite as informações utilizadas para se determinar o estado do sistema e repassa aos dispositivos de controle os comandos a serem efetuados.

O primeiro componente, denominado Gestor de Controle, é responsável por determinar o estado do sistema por meio da resolução do problema de Fluxo de Carga. Em seguida, o Gestor de Controle define quais as barras possuem magnitude de tensão fora dos limites operacionais adequados e aplica duas metodologias desenvolvidas para determinar a sequência dos ajustes. A definição desses ajustes é determinada em função de análises de sensibilidade baseadas na matriz Jacobiana reduzida (J_{QV}) das equações de balanço de potência do sistema, a qual relaciona variações da injeção de potência reativa com variações nas magnitudes de tensão nas barras do sistema ([LAGE; FERNANDES; COSTA, 2013](#)).

O segundo componente corresponde aos Nós de Controle, que são os equipamentos diretamente ligados aos dispositivos de controle e utilizados para manter o sistema operando de forma adequada. Os Nós de Controle recebem as mensagens do Gestor de Controle e

efetuam os ajustes recomendados.

O terceiro componente corresponde à Infraestrutura de Comunicação, formada por um conjunto de dispositivos com capacidade para transmissão de dados referentes ao estado do sistema e aos comandos de regulação a serem executados pelos Nós de Controle. Sua principal finalidade é, portanto, intermediar a troca de informações entre o Gestor de Controle e os Nós de Controle. Na Infraestrutura de Comunicação, todo o tráfego de dados é provido pela tecnologia de comunicação sem fio WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*), tendo em vista que esta tecnologia define as especificações das camadas MAC (*Media Access Control*) e física para um acesso banda larga sem fio, apresentando-se como uma alternativa às redes com fio (tais como fibra óptica e sistemas baseados em cabo coaxial) (ZHANG et al., 2011).

Objetivos

O objetivo principal deste trabalho consiste em definir e aplicar uma sequência de ajustes para corrigir as violações na magnitude de tensão em barras de carga de um sistema de transmissão de energia elétrica.

Além disso, pretende-se alcançar os seguintes objetivos específicos:

- Aplicar o Fluxo de Carga para determinar o ponto de operação da rede elétrica, determinando as tensões fora da faixa definida pela ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) e calcular a matriz J_{QV} (associado ao Gestor de Controle);
- Aplicar duas metodologias distintas (MaxQ e VSF) para definir o conjunto de barras de controle a operar, no intuito de corrigir as violações de tensão (associado ao Gestor de Controle);
- Utilizar a matriz J_{QV} para determinar a quantidade de potência reativa a ser injetada ou absorvida pelas barras de controle (associado ao Gestor de Controle);
- Processar os comandos de controle, encaminhados pela rede de dados, para executar os ajustes no sistema (associado aos Nós de Controle);
- Aplicar a ferramenta NS-3 (TARIQ et al., 2014) para representar os elementos da infraestrutura de comunicação, construir um protótipo para transmissão de dados entre os dispositivos instalados no sistema e obter as métricas de tráfego (associado a Infraestrutura de Comunicação);
- Aplicar a tecnologia WiMAX para interconectar o sistema e transmitir os comandos de regulação (associado a Infraestrutura de Comunicação).

Justificativa

A abordagem proposta é aplicada para controlar as magnitudes de tensão nas barras de carga do sistema de transmissão de energia elétrica e utiliza o redespacho de potência reativa para levar as magnitudes de tensão violadas à faixa de operação adequada. O despacho de potência reativa tem sido aplicado de forma bem sucedida em diferentes abordagens apresentadas na literatura (ZABAIYOU; DESSAINT; KAMWA, 2014; LOIA; VACCARO; VAISAKH, 2013; CALDERARO et al., 2015). Nesse contexto, a determinação das barras de controle a serem ajustadas é realizada por intermédio de análises de sensibilidade, aplicando índices que mensuram o impacto que variações na injeção de potência reativa produzem nas magnitudes de tensão das barras de carga do sistema.

Contribuições Científicas

O trabalhos produzido e publicado relacionado a este trabalho é o seguinte:

- Silva, T.A.R, Rabêlo, R.A.L., Barbosa, D., Fernandes, R.A.S, Lage, G.G. (2015). Infraestrutura de Comunicação Baseada em SDN-DWDM para Redes de Transmissão de Energia Elétrica Inteligentes. Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente.

Contribuições

As contribuições relacionadas a abordagem proposta neste trabalho podem ser resumidas como:

1. Determinação de uma sequência de ajustes a serem executados nos dispositivos de controle, injetando potência reativa no sistema para corrigir as violações de tensão;
2. Estudo e desenvolvimento de duas metodologias de controle baseadas na máxima variação de potência reativa e índices de sensibilidade (informações extraídas a partir da matriz J_{QV}) para definir o conjunto de barras de controle a serem ajustadas e determinação dos ajustes nas magnitudes de tensão dos geradores síncronos (obtida por meio de cálculos executados com base na matriz J_{QV}) a fim de injetar potência reativa para corrigir as violações de tensão;
3. Aplicação de uma Infraestrutura de Comunicação capaz de dar suporte à tomada de decisão sobre quais dispositivos de controle devem ser operados no sistema, viabilizando a transmissão dos procedimentos definidos pelo Gestor de Controle aos Nós de Controle;

4. Avaliação do atraso e volume de dados trafegados, bem como da disponibilidade média da rede de dados, com o intuito de quantificar a capacidade da infraestrutura de comunicação em atender a carga de tráfego transmitido.

Estrutura do Trabalho

O Capítulo 1, inicialmente, descreve o papel desempenhado pelo cálculo do Fluxo de Carga na abordagem proposta e define o problema do controle da magnitude de tensão. Em seguida, aspectos importantes quanto à integração entre o sistema de energia elétrica e a rede de comunicação de dados são definidos e é apresentada a tecnologia WiMAX. Por fim, são apresentados trabalhos relacionados à proposição de soluções que combinam métodos de controle da magnitude de tensão com uma infraestrutura de comunicação.

O Capítulo 2 apresenta cada um dos componentes da abordagem proposta e as metodologias de controle utilizadas para definir a sequência de ajustes no controle da magnitude de tensão, detalhando como a abordagem atua para manter o sistema operando nos limites estabelecidos pelo ONS.

O Capítulo 3 descreve os testes realizados para avaliar a abordagem proposta, apresenta os parâmetros utilizados para configurar o canal de comunicação e discute os resultados obtidos por meio da simulação da abordagem no NS-3.

O Capítulo 4 apresenta as conclusões, enumera as limitações da abordagem e descreve as perspectivas para continuação deste trabalho.

1 Referencial Teórico

Neste capítulo são apresentados conceitos associados aos sistemas de transmissão de energia elétrica e de dados. Inicialmente, descreve-se o problema de Fluxo de Carga e o controle da magnitude de tensão. Em seguida, discute-se como o redespacho de potência reativa é utilizado neste trabalho para corrigir violações de tensão. Com relação à infraestrutura de comunicação, o histórico e o funcionamento básico do padrão WiMAX são apresentados, e é descrita a formulação da análise de disponibilidade a ser realizada sobre a rede de dados. Por fim, são listados trabalhos relacionados a abordagem proposta.

1.1 O Problema de Fluxo de Carga

O Fluxo de Carga é uma ferramenta muito importante para a análise dos sistemas elétricos de potência, pois fornece informações importantes sobre o seu estado sob diversos cenários operacionais, sendo útil para estabelecer um plano de gerenciamento no qual são definidas ações preventivas ou corretivas que podem ser realizadas para que o sistema seja restaurado à operação normal.

O cálculo de Fluxo de Carga consiste na determinação das grandezas que representam o comportamento de uma rede elétrica em caráter de regime permanente. Basicamente, a resolução do problema de Fluxo de Carga é efetuada por meio de métodos específicos para resolução de sistemas de equações não lineares, fornecendo seu estado, isto é, a magnitude e o ângulo de fase da tensão em cada barra da rede. Com o estado conhecido, é possível determinar outras grandezas de interesse, como: a geração de potência reativa nas barras de geração, a distribuição dos fluxos de potência ativa e reativa nas linhas de transmissão etc.

O problema de Fluxo de Carga pode ser formulado por um sistema de equações e inequações algébricas não lineares que correspondem, respectivamente, às leis de Kirchhoff e a um conjunto de restrições operacionais da rede elétrica e seus componentes. Na formulação básica do problema, a cada barra k da rede são associadas quatro grandezas escalares ([LAGE, 2013](#)):

- a magnitude V_k da tensão na barra;
- o ângulo de fase θ_k da tensão na barra;
- a potência ativa líquida P_k injetada na barra; e
- a potência reativa líquida Q_k injetada na barra;

Na formulação básica do problema de Fluxo de Carga, somente os valores de duas dessas grandezas em cada barra são conhecidos a priori e dependendo de quais grandezas são dados e quais são incógnitas, definem-se três tipos de barras:

1. Barra $V\theta$, barra de referência angular, ou barra *slack*:
 - V_k e θ_k são dados;
 - P_k e Q_k são calculados de forma a fechar o balanço de potência da rede elétrica.
2. Barra PV , ou barra de geração:
 - P_k e V_k são dados;
 - Q_k e θ_k são calculados.
3. Barra PQ , ou barra de carga:
 - P_k e Q_k são dados;
 - V_k e θ_k são calculados.

Na determinação do conjunto de equações não lineares que representam o modelo da rede elétrica, duas equações são associadas a cada barra, obtidas por meio da lei do nós de Kirchhoff, segundo a qual as injeções líquidas de potência ativa e reativa em uma barra k são iguais, respectivamente, à soma dos fluxos de potência ativa e reativa que deixam essa barra. A imposição da conservação das potências ativa e reativa a cada barra da rede pode ser expressa matematicamente pelas equações de fechamento de balanço:

$$P_k - \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m, t_{km}, \varphi_{km}) = 0 \quad (1.1)$$

$$Q_k + Q_k^{sh}(V_k, b_k^{sh}) - \sum_{m \in \Omega_k} Q_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m, t_{km}, \varphi_{km}) = 0 \quad (1.2)$$

onde:

- Q_k^{sh} injeção de potência reativa na barra k pelo elemento *shunt*;
- b_k^{sh} susceptância do elemento *shunt* conectado à barra k ;
- Ω_k é o conjunto das barras vizinhas à barra k ;
- P_{km} é o fluxo de potência ativa no ramo $k-m$;
- Q_{km} é o fluxo de potência reativa no ramo $k-m$;
- t_{km} é o tap do transformador em fase associado ao ramo $k-m$;

- φ_{km} é o ângulo de defasagem do transformador defasador associado ao ramo $k-m$.

Além das equações de balanço de potência, uma rede elétrica também possui uma série de limites operacionais que influem diretamente na determinação das suas condições de operação e que devem, portanto, ser incluídas na sua modelagem para que o ponto de operação possa ser determinado corretamente. Na resolução do problema de Fluxo de Carga, esses limites operacionais da rede elétrica e de seus componentes são, geralmente, verificados por passos externos ao algoritmo de resolução das equações de balanço do modelo da rede.

O conjunto de inequações que fazem parte do problema de Fluxo de Carga é formado pelas seguintes restrições:

- limites nas magnitudes de tensão nas barras de carga:

$$V_k^{min} \leq V_k \leq V_k^{max}; \quad (1.3)$$

- limites na geração de potência reativa:

$$Q_{G_k}^{min} \leq Q_{G_k} \leq Q_{G_k}^{max}; \quad (1.4)$$

- limites nos taps dos transformadores em fase:

$$t_{km}^{min} \leq t_{km} \leq t_{km}^{max}. \quad (1.5)$$

Em geral, para resolver o problema de Fluxo de Carga utilizam-se métodos computacionais, dentre os quais destacam-se os algoritmos de Gauss-Seidel, Newton-Raphson (TINNEY; HART, 1967), Newton desacoplado (STOTT, 1972), e desacoplado rápido (STOTT; ALSAÇ, 1974). Todos estes métodos conseguem determinar os valores das grandezas características do sistema dentro de uma tolerância predeterminada (MONTICELLI; GARCIA, 1999).

Por fim, é válido também apresentar a expressão matemática para as perdas de potência ativa da rede elétrica, calculadas por meio de:

$$P_{km}^{perdas} = g_{km} \left[\frac{1}{t_{km}^2} V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos(\theta_{km} - \varphi_{km}) \right] \quad (1.6)$$

1.2 Controle da Magnitude de Tensão

O problema do Controle da Magnitude de Tensão pode ser solucionado se os operadores conhecerem os perfis de tensão nas barras do sistema, a evolução da demanda sobre um determinado período de tempo e quais controles podem ser ajustados para

manter o sistema operando de forma segura (COSTA, 2012). No entanto, a sequência de ajuste desses controles consiste em um grande desafio, pois os dispositivos de controle devem ser operados de forma coordenada a fim de que sua atuação conjunta garanta a operação segura do sistema durante todo esse processo.

Um sistema de potência é constituído por um conjunto de barras interconectadas por linhas de transmissão e transformadores, e o controle de tensão consiste em manter as magnitudes de tensão nas barras de carga dentro de uma faixa de funcionamento adequada. Um dos principais fatores que levam as tensões a valores não adequados é a incapacidade do sistema em atender a demanda de potência reativa. Portanto, revela-se essencial que sejam implementados mecanismos de controle que determinem um despacho de potência reativa suficiente para que as magnitudes de tensão nas barras possam ser restauradas à faixa de operação adequada (EREMIA; SHAHIDEHPOUR, 2013).

Determinadas ocorrências, como a indisponibilidade de potência reativa, podem levar o sistema a um progressivo declínio da tensão em uma barra e, dependendo das características das cargas e dos dispositivos de controle de tensão a ela conectados, podem resultar na interrupção do abastecimento de energia elétrica e danos a equipamentos (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994). Para corrigir valores de magnitude de tensão inadequados pode ser aplicado o despacho de potência reativa, que consiste na alocação de potência reativa objetivando manter todas as magnitudes de tensão dentro de limites pré-estabelecidos e satisfazendo um conjunto de restrições próprias do funcionamento da rede elétrica (NIKNAM et al., 2013).

De acordo com Calderaro et al. (2014), o controle da magnitude de tensão efetuado por intermédio do redespacho de potência reativa é implementado tradicionalmente de forma centralizada, exigindo um substancial investimento em sistemas de controle e comunicação de dados, haja vista a necessidade de uma grande quantidade de dados ser transmitida a um centro de controle. Por outro lado, uma abordagem descentralizada, atuando localmente pode ser implementada para reduzir o gargalo de comunicação, entretanto, o desempenho do controle descentralizado precisa ser aprimorado com relação às ações de regulação definidas, uma vez que o controle centralizado normalmente produz um resultado global melhor e mais robusto (CALDERARO et al., 2015).

No entanto, independentemente da abordagem de controle adotada (centralizada ou descentralizada), qualquer sistema de potência é equipado com dispositivos de controle para manter a confiabilidade e eficiência de suas funções. Contudo, os operadores desses sistemas são colocados frente a desafios como a inclusão de geração distribuída, injetando potência a partir da rede de distribuição e cujo fluxo de potência pode alterar o funcionamento da rede elétrica, ocasionando distúrbios de tensão e resultando em outros impactos negativos (MOMOH, 2012). Para contornar este problema torna-se relevante propor o estabelecimento de um sistema automatizado, constituído por um conjunto de equipamentos

para comunicação de dados e aplicações, com o objetivo de aprimorar a qualidade do sistema de potência (YAN et al., 2013).

A execução das operações de controle torna a infraestrutura de tráfego de dados um componente crucial, uma vez que muitas informações significativas podem ser extraídas dos mais diversos equipamentos instalados no sistema de potência. Portanto, é essencial definir a rede de comunicação e encontrar a melhor tecnologia para transmissão de dados, tendo em vista que prover um serviço confiável e seguro de dados tornou-se essencial para aprimorar o funcionamento do sistema, possibilitando uma recuperação rápida da rede elétrica quando ocorrem faltas. Nesse sentido, Fang et al. (2012) descreve que a infraestrutura de comunicação de dados aplicada a um sistema de potência deve satisfazer os seguintes requisitos:

- Suportar Qualidade de Serviço (*Quality of Service - QoS*): dados críticos devem ser entregues num determinado intervalo de tempo;
- Alta confiabilidade e disponibilidade: um grande número de dispositivos deve ser conectado e estes dispositivos podem usar diferentes tecnologias para comunicação de dados. Mesmo assim, a transmissão dos dados deve ser garantida sempre que houver um dado a ser transmitido;
- Alta cobertura e pervasividade: os dispositivos de comunicação devem conectar grande parte do sistema de potência, sem interferir nos procedimentos para o fornecimento de energia elétrica. Assim, é possível que o sistema atue em resposta a qualquer distúrbio.

Dessa forma, é possível perceber que a comunicação entre cada componente do sistema é extremamente importante para maximizar o uso de potência disponível de um modo confiável e a um custo efetivo (VADLAMUDI; KARKI, 2012). No entanto, projetar uma rede de dados aplicável às operações de controle da magnitude de tensão em um sistema de potência ainda é um desafio, pois, em geral, a abordagem hierárquica de controle tradicional não pode ser considerada. A estrutura do sistema tem evoluído e funciona como um sistema nervoso, no qual muitas tarefas são realizadas pela colaboração de um conjunto de agentes autônomos, de uma forma mais aprimorada do que se fosse envolvido um sistema hierárquico completo (ZHABELOVA; VYATKIN, 2012).

1.3 Infraestrutura de Comunicação

Nesta seção é apresentada a tecnologia WiMAX, descrevendo a evolução do padrão e as características fundamentais de seu funcionamento. Por fim, é descrita a formulação utilizada para computar a disponibilidade média da rede.

1.3.1 WiMAX

O IEEE 802.16 *Working Group* (WG) mantém e aprimora o padrão 802.16, recomendando práticas que dão suporte ao desenvolvimento e implantação das redes banda larga de acesso metropolitano sem fio. Tudo foi iniciado com o estabelecimento do SG-BWA (*Study Group on Broadband Wireless Access*) que foi apelidado de 802.N-WEST pelo NIST (*National Institute of Standards and Technology*) (IEEE, 1998).

Inicialmente, o projeto do 802.16 focava na definição de uma interface sem fio para a faixa de frequência entre 10 e 66 GHz com uma única portadora na camada física, a qual foi denominada WirelessMAN-SC (*Single Carrier*). Contudo, em novembro de 1999, foi definido um padrão complementar que desse suporte a faixa de 2 a 11 GHz, que foi aprovado em março de 2000. Dessa forma, o projeto passou a contemplar três diferentes opções para a camada física de 2 a 11 GHz: WirelessMANSCa (*Single Carrier*), WirelessMAN-OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) e WirelessMAN-OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) (IEEE, 1999).

Ainda em dezembro de 2000, o esboço do W-HUMAN (*Wireless High-Speed Unlicensed Metropolitan Area Network*) foi aprovado e resultou no projeto 802.16.1, que inclusive tem suporte para frequências isentas de licença (IEEE, 2000). No início de 2001, o 802.16 WG passou a ter três projetos ativos: 802.16.1, 802.16.1b e 802.16.37, no entanto, o foco do projeto continuou no desenvolvimento de diferentes opções de camada física, mantendo-se somente um único protocolo MAC para dar suporte a transmissão (IEEE-SA, 2001).

Em dezembro de 2002, foi aprovado para desenvolvimento uma alteração aplicada ao IEEE 802.16-2001, resultando no projeto 802.16d e na utilização de baixas frequências (2 - 11 GHz). O padrão continuou a evoluir e foi definido o *Mobile Wireless MAN Study Group*, com a função de adicionar mobilidade ao WiMAX. Então, foi construído um projeto para o 802.16 móvel que, adicionalmente, atenderia a um número de subportadoras WirelessMAN-OFDMA, dando suporte a diversas transmissões concorrentes, em conformidade com a largura de banda usada. Em setembro de 2005, o projeto 802.16f-2005 foi aprovado e no mês seguinte foram estabelecidos mecanismos para gerenciamento de informações de base (com intuito de fornecer suporte às novas características do 802.16e), resultando no padrão 802.16i (HAASZ, 2005).

Em março de 2006, foram realizadas adaptações nas especificações da camada física WirelessMAN-OFDMA, incluindo uma zona com menor interferência para transmissão entre estações de repetição e estações móveis (IEEE, 2005). Em março de 2009 uma nova revisão do IEEE 802.16-2009 foi realizada para corrigir algumas limitações do padrão 802.16-2004. Como não havia mais interesse na camada física com uma única portadora para as frequências de 2-11 GHz, as especificações do WirelessMAN-SCa foram

removidas e somente o WirelessMAN-SC, WirelessMAN-OFDM e WirelessMAN-OFDMA permaneceram (MARKS, 2009).

Na prática, o WiMAX utiliza o mesmo meio de transmissão que o WiFi (*Wireless Fidelity*), mas possui uma velocidade mais alta, cobre distâncias maiores, atende um número bem maior de usuários e pode levar acesso a internet banda larga à áreas onde instalar transmissão cabeada seria muito custoso (KUROSE et al., 2010). Para tanto, o padrão 802.16 divide o meio físico em *frames* de comprimento fixo e cada *frame* é particionado nos *subframes* de *Downlink* (DL) e *Uplink* (UL), aplicados para recepção e transmissão de mensagens, respectivamente. O WiMAX oferece suporte a duas técnicas de duplexação: FDD (*Frequency Division Duplex*) e TDD (*Time Division Duplex*). No FDD os *subframes* DL e UL são transmitidos simultaneamente, mas em diferentes frequências; enquanto no TDD os *subframes* são transmitidos em intervalos diferentes e compartilham a mesma frequência.

O WiMAX suporta as topologias Ponto Multiponto (PMP) e *Mesh*, sendo ainda o meio de acesso sem fio baseado em TDMA (*Time Division Multiple Access*) ou FDMA (*Frequency Division Multiple Access*) (PAREIT et al., 2012). No modo PMP as Estações Clientes (*Subscriber Station* - SS) comunicam-se através de uma Estação Base (*Base Station* - BS), de forma semelhante ao funcionamento das células de telefonia móvel, no qual as SSs possuem um receptor com antena e a estação base fornece uma determinada área de cobertura e conexão, enquanto no modo de rede *Mesh*, as estações são organizados de forma *ad-hoc* e se comunicam diretamente uns com os outros.

O modo PMP foi adotado neste trabalho por apresentar a infraestrutura mais simples para implantação e gerenciamento. Este modo disponibiliza quatro classes de Qualidade de Serviço e a camada MAC é dividida, tradicionalmente, em duas sub-camadas, que são a *Convergence Sublayer* (CS) e a *Common-Part Sublayer* (CPS). A CS é responsável por receber Unidades de Dados de Protocolo da camada superior (camada de rede), classificando-as para as conexões apropriadas e os direcionando ao Ponto de Acesso adequado. Por fim, a CPS fornece as funcionalidades fundamentais do MAC, incluindo o estabelecimento e gerenciamento das conexões, geração de mensagens de controle do MAC, bem como é responsável pela concessão da largura de banda aos fluxos de dados, permitindo as SSs transmitirem os *frames*.

O MAC no modo PMP é orientado a conexão (antes dos dados serem transmitidos, as SSs e a estação base definem um canal de comunicação) e define dois tipos de conexões: conexões para gerenciamento de mensagens de controle e conexões para transporte de dados. Antes de ser iniciada a transmissão, uma SS deve sincronizar-se e para isso escuta as frequências do canal de *downlink* (canal utilizado para receber pacotes da BS), buscando uma frequência adequada e ao detectar um *frame*, estabelece a sincronização com uma BS, adquirindo os parâmetros do canal *uplink* (canal para transmissão de pacotes), finalizando

assim o processo de entrada na rede. A partir desse momento, toda comunicação entre os clientes é mapeada como um Fluxo de Serviço, que consiste num fluxo unidirecional de unidades de dados da camada MAC sobre uma conexão de transporte e que garante requisitos específicos de QoS.

1.3.2 Análise de Disponibilidade da Rede

A análise aplicada neste trabalho é baseada na proposta de (LÉVESQUE; MAIER, 2014), que é modelada considerando os limites do protocolo MAC, os quais podem afetar a disponibilidade da rede de acordo com a quantidade de tráfego roteado na rede. São consideradas as condições de transmissão na rede, aplicando análise do atraso e do volume de dados, bem como o cálculo de disponibilidade da rede de dados.

Análise de Atraso e Volume de Dados da Rede

O atraso de uma rede de dados pode interferir na qualidade do serviço fornecido pelo sistema e é classificado em quatro tipos: atraso de processamento, de fila, de transmissão e de propagação, sendo a soma de todos igual ao atraso total. O atraso fim-a-fim (T) para entrega de um pacote (p) é definido como a soma dos atrasos em todos os enlaces do caminho que conecta os dispositivos l e n e pode ser calculado por meio da Equação 1.7:

$$T_{l,n}^p = \sum_{n \in \Omega_{l,n}} (T_n^r + T_n^q + T_n^t + T_n^f), \quad (1.7)$$

na qual:

- $\Omega_{l,n}$ corresponde ao conjunto de nós que conectam o nós l e n ;
- T_n^r é o tempo de processamento do nó de comutação n ;
- T_n^q é o tempo de enfileiramento do nó de comutação n ;
- T_n^t é o tempo de transmissão do nó de comutação n ;
- T_n^f é o tempo de propagação do nó de comutação n .

Em contrapartida, o volume de dados pode influenciar o grau de congestionamento da rede, devido ao fluxo transmitido em um canal de comunicação estar além da capacidade de processamento dos dispositivos de comunicação. Nesse sentido, para avaliar o volume de dados são consideradas as classes de controle (C_{crt}) e de tráfego regular (C_r), geradas por quaisquer aplicações distintas do controle da magnitude de tensão e que podem ser executadas no sistema. O tráfego completo gerado por todas as classes (C) é dado por $C = C_r + C_{crt}$, bem como cada tráfego tem um tamanho médio de pacote dado por \bar{L}_c .

Cálculo de Disponibilidade

A análise de disponibilidade é computada para redes WiMAX e DWDM, sendo utilizado um modelo de rede óptica Wavelength-routing (WR) multi-stage WDM, tendo em vista que na rede DWDM empregada, um dado comprimento de onda (λ) pode ser usado por um conjunto de estações ópticas e diversos comprimentos de onda são compartilhados por enlaces conectando diferentes nós do sistema, formando, por conseguinte, setores de nós ópticos. A disponibilidade é caracterizada pelo descarte de pacotes e probabilidade de falha de transmissão, assim, cada nó é definido com um comprimento de fila máximo Q_{fw} e os *frames* são descartados de acordo com a Equação 1.8 (LÉVESQUE; MAIER, 2014):

$$B(\sigma) = \begin{cases} \frac{(1 - \sigma) * \sigma^{Q_{fw}+1}}{1 - \sigma^{Q_{fw}+1}}, & \text{se } 0 \leq \sigma < 1 \\ 1 - \frac{1}{\sigma}, & \text{se } \sigma \geq 1 \end{cases} \quad (1.8)$$

As probabilidades de bloqueio são calculadas nas portas de saída das SSs e dos nós ópticos, sendo definidos como seguinte:

- $B(\sigma_{wi}^w)$ é a probabilidade de bloqueio na porta de saída de uma SS;
- $B(\sigma^{op,u})$ é a probabilidade de bloqueio para fluxo *upstream* na porta óptica
- $B(\sigma^{op,d})$ é a probabilidade de bloqueio para fluxo *downstream* na porta óptica;

Adicionalmente, é necessário caracterizar a rede de dados com base na intensidade de tráfego (métrica usada para calcular a probabilidade de bloqueio) e para isso é definida a Matriz de Tráfego para o conjunto de nós da rede (\mathcal{N}), consistindo em um conjunto de conexões fonte-destino caracterizada por uma taxa de tráfego (em *frames/sec*): $M_{i,j,c}$, na qual $i, j \in \mathcal{N}$ e $c \in C$. $M_{i,j,c} = 0$ para $i = j, \forall c \in C$. Para o tráfego no domínio sem fio, é definido $M'_{i,j,c}$ seguindo a matriz com as mesmas propriedades como $M_{i,j,c}$.

Como cada classe $c \in C$ tem uma prioridade α_c , tal que $\sum_{c \in C} \alpha_c = 1$, então um *frame* é associado a $B(\sigma)$ por meio da Equação 1.9 (LÉVESQUE; MAIER, 2014):

$$\chi_c(R, \sigma) = \frac{\min(AdmS2_c(R, \sigma), R_c \cdot \bar{L}_c)}{R_c \cdot \bar{L}_c} \quad (1.9)$$

na qual,

- R é o conjunto de taxas de tráfego de uma porta de saída;
- σ é a intensidade de tráfego de uma porta de saída;
- R_c é a intensidade de tráfego associado à classe c ;

- \bar{L}_c é o tamanho médio do pacote da classe c ;

A Equação 1.10 (LÉVESQUE; MAIER, 2014) define a carga de tráfego e taxa de dados suportadas por classe, portanto, $AdmS2_c$ corresponde a banda concedida para a classe c ,

$$AdmS2_c(R, \sigma) = AdmS1_c(R, \sigma) - \sum_{\forall I \neq c, \alpha_i = \alpha_c} \min(AdmS1_c(R, \sigma) * \frac{1}{[|i \in C_{|\alpha_i = \alpha_c}|]}, R_i * \bar{L}_i) \quad (1.10)$$

$AdmS1_c(R, \sigma)$ é dada pela Equação 1.11.

$$AdmS1_c(R, \sigma) = (1 - B(\sigma)) * \sum_{i \in C} R_i * \bar{L}_i - \sum_{\forall i, \alpha_i > \alpha_c} R_i * \bar{L}_i \quad (1.11)$$

A taxa de tráfego de classe c destinada a n de um dado SS w com suporte sem fio é dado pela Equação 1.12 (LÉVESQUE; MAIER, 2014):

$$R_{w,n,c}^{wi} = M'_{w,n,c} \quad (1.12)$$

na qual $n \in \mathcal{N}$. Para um dado nó com uma interface WiMAX enviar um pacote para um nó n , a taxa de tráfego da classe c leva em conta o tráfego forçado a ser enviado para o domínio sem fio e o tráfego óptico destinado a ser roteado no domínio sem fio, por causa de falha na transmissão óptica, conforme Equação 1.13 (LÉVESQUE; MAIER, 2014):

$$R_{w,n,c}^{wi} = M'_{w,n,c} + R_{o,n,c}^{op,f} \quad (1.13)$$

na qual

$$R_{o,n,c}^{op,f} = \begin{cases} \varrho_{o,n,c}^{op,f}, & \text{se } \exists z \in W_z \wedge o \in W_z \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (1.14)$$

$\varrho_{o,n,c}^{op,f}$ é dado por:

$$\varrho_{o,n,c}^{op,f} = \delta_{o,z}^{wi} \cdot M_{o,n,c} \cdot \left(1 - \chi_c \left(\left[\sum_{\forall} R_{o,n'}^{op,u}, \forall c' \right] \cdot \prod_{i=s(o)}^0 (1 - p_i^{op}) \right) \right) \quad (1.15)$$

A intensidade de tráfego para uma dada interface sem fio $w \in W_z$, na zona z é definido como a taxa de tráfego multiplicado pelo *delay* de acesso, conforme Equação

$$\sigma_w^{wi} = \sum_{c \in C_{sg}} \sum_{n \in 0 \cup \mathcal{O}} R_{w,n,c}^{wi} \cdot E[T_{pkt,z}] \quad (1.16)$$

Já para o domínio com fio, a taxa de tráfego *upstream* da classe c de um dado nó o , com $n \neq o$ é dado por (LÉVESQUE; MAIER, 2014):

$$\begin{aligned}
R_{o,n,c}^{op,u} = & M_{o,n} + \delta_{o,0}^{op} \cdot M'_{o,n,c} \left[1 - \chi_c \left(\left[1 - \chi_c \left(\left[\sum_{\forall n'} R_{o,n'}^{wi}, \forall c' \right], \sigma_o^{wi} \right) \cdot (1 - p_z^{wi}) \right] \right) \right] \\
& + \sum_{w \in W_o} M'_{w,n,c} \cdot (1 - p_o^{wi}) \cdot \chi_c \left(\left[\sum_{\forall n'} R_{w,n'}^{wi}, \forall c' \right], \sigma_{o_2}^{wi} \right) \\
& + \sum_{o_2 \in W_o} R_{o_2,n,c}^{op,e} \cdot \left[1 - \chi_c \left(\left[\sum_{\forall n'} R_{o_2,n'}^{wi}, \sigma_{o_2}^{wi} \right] \cdot (1 - \sigma_o^{wi}) \right) \right] \quad (1.17)
\end{aligned}$$

A intensidade de tráfego *upstream* para WR é dada pela Equação 1.18 (LÉVESQUE; MAIER, 2014):

$$\sigma_c^{op,d} = \sum_{c \in C} \frac{\bar{L}_c}{C_{op}} \cdot \sum_{o \in S_\lambda} \sum_{n \in \mathcal{O} \cup \mathcal{O}-o} R_{o,n,c}^{op,u} \quad (1.18)$$

A taxa de tráfego *downstream* de classe c para WR é dada pela Equação 1.19 (LÉVESQUE; MAIER, 2014):

$$\begin{aligned}
R_{\lambda,c}^{op,d} = & \sum_{o \in S_\lambda} M_{0,o,c} + \sum_{l=1}^{\Lambda} \sum_{n \in S_l} R_{n,o,c}^{op,u} \cdot \chi_c \left(\left[\sum_{\forall n' \in \mathcal{O}} R_{o,n'}^{op,u}, \forall c' \right], \sigma_l^{op,u} \right) \cdot \prod_{i=s(n)}^0 (1 - p_i^{op}) \\
& + \sum_{w \in W_0} R_{w,o,c}^{wi} \cdot \chi_c \left(\left[\sum_{\forall n' \in \mathcal{O}}, \forall c' \right], \sigma_w^{op,u} \right) \cdot (1 - \sigma_0^{wi}) \quad (1.19)
\end{aligned}$$

A intensidade de tráfego para a WR é dada pela Equação 1.20 (LÉVESQUE; MAIER, 2014):

$$\sigma_\lambda^{op,d} = \sum_{c \in C} \frac{\bar{L}_c}{C_{op}} \cdot R_{\lambda,c}^{op,d} \quad (1.20)$$

Por fim, a disponibilidade probabilística de um único salto sem fio é obtida por meio da Equação 1.21 (LÉVESQUE; MAIER, 2014), representando a probabilidade que nenhum *frame* é descartado e que não há falha de BS.

$$A_{w,z,c}^{wi,wi} = \chi_c \left(\left[\sum_{\forall n'} R_{w,n'}^{wi} \right], \sigma_w^{wi} \cdot (1 - p_z^{wi}) \right) \quad (1.21)$$

na qual:

- p_z^{wi} é o a probabilidade de falha de uma estação base.

1.4 Trabalhos Relacionados

Esta seção apresenta trabalhos relacionados à abordagem proposta. Inicialmente são expostos trabalhos associados ao controle da magnitude de tensão, por fim, são exibidas propostas relativas à Infraestrutura de Comunicação.

1.4.1 Controle da Magnitude de Tensão

Loia, Vaccaro e Vaisakh (2013) introduziram uma abordagem descentralizada para o controle da magnitude de tensão baseada em uma população de agentes cooperativos *fuzzy*. O objetivo da proposta consiste em identificar uma solução de controle para regular as tensões violadas por meio da interação entre os agentes. Nesse sentido, o controle da magnitude de tensão foi formalizado como um problema de programação linear *fuzzy*, sendo que as violações de tensão, a capacidade de controle dos equipamentos de regulação e as variáveis de controle do sistema foram modeladas como variáveis *fuzzy*. Então, cada agente avalia localmente as variáveis caracterizando o comportamento do sistema (magnitudes de tensões máxima, mínima e média do sistema), aplicando os operadores *fuzzy*. Por intermédio de um protocolo de consenso e da troca de mensagens com os agentes vizinhos, define-se a variação a ser executada no despacho de potência reativa. Os resultados obtidos no sistema de potência de teste demonstraram que a abordagem de controle define uma solução factível, dentro de um intervalo de tempo válido. No entanto, detalhes específicos da infraestrutura de comunicação para troca de dados entre a população de agentes não são apresentadas.

Rahideh, Gitizadeh e Rahideh (2006) propuseram um método baseado em lógica *fuzzy* para o controle de potência reativa e magnitude de tensão. O objetivo da proposta é fornecer uma solução, capaz de manter as tensões dentro de uma faixa de valores e reduzir a perda de potência em redes elétricas. No método apresentado, em um primeiro estágio, o nível de violação de tensão e a habilidade de controle dos dispositivos de regulação são mapeados em variáveis *fuzzy* e o operador max-min é usado para encontrar soluções capazes de melhorar o perfil de tensão. Finalmente, o operador min é usado para minimizar as perdas de potência. Os resultados apresentados no sistema de 30 barras do IEEE e na rede elétrica Fars exibem que o método proposto é rápido, eficiente e capaz de reduzir as perdas de potência e regular as magnitudes de tensões simultaneamente. No entanto, a abordagem define de forma centralizada os ajustes de regulação a serem executados sem analisar aspectos de comunicação.

Zabaiou, Dessaint e Kamwa (2014) apresentaram uma abordagem para o Fluxo de Potência Ótimo (FPO) com restrições numéricas associadas a estabilidade de tensão, denominada *Voltage Stability Constrained Optimal Power Flow* (VSC-OPF) é proposta. A abordagem incorpora o índice *Voltage Collapse Proximity Indicator* (VCPI) ao FPO

clássico de duas formas. Inicialmente, o VCPI é testado como uma inequação adicional ao FPO, e na outra versão o índice é formulado como uma função objetivo do FPO e minimizado para melhorar a estabilidade de tensão do sistema. A abordagem é testada nos sistemas de 30 e 57 barras do IEEE. Os resultados das simulações, em cenários de contingência, exibem o potencial da abordagem para minimizar as perdas de potência ativa, produzindo uma solução com baixo custo computacional. No entanto, a abordagem não determina a sequência de ajuste nas variáveis de controle.

Chen et al. (2015) propuseram uma metodologia para controle de tensão baseada no despacho de potência reativa combinando os dispositivos de controle tradicional com geradores distribuídos. O objetivo da proposta é combinar variantes do PSO (*Particle Swarm Optimization*) com um Sistema de Inferência *Fuzzy* para determinar o redespacho de potência reativa. A variação na geração de potência reativa é formulada como um problema de programação não linear, resolvido pelo PSO, e o sistema *fuzzy* adaptativo é utilizado para melhorar o processo de convergência da meta-heurística. Os resultados numéricos, obtidos por meio de simulações da metodologia, comprovam sua capacidade em encontrar uma solução de controle promissora, com um tempo de computação menor quando comparado com outras técnicas de inteligência computacional. No entanto, a abordagem não avalia aspectos como a obtenção de dados da rede elétrica oriundos de diferentes pontos do sistema e a influência que a captura dessas informações produz na determinação da solução.

1.4.2 Infraestrutura de Comunicação

Capitanescu, Bilibin e Ramos (2014) apresentaram um modelo para analisar o atraso de comunicação para conectar os dispositivos de um sistema de potência. O objetivo do modelo é tratar os atrasos das aplicações de sistemas de potência que transmitem informações sobre diferentes redes de comunicação, e que por isso a entrega das mensagens em um tempo adequado não pode ser garantida. Nesse contexto, um modelo que estima o tempo de enfileiramento é definido para calcular a performance das redes de comunicação que conectam um DGI (*Distributed Grid Intelligence*). Para avaliar o modelo proposto, um *testbed* denominado FREEDM (*Future Renewable Electric Energy Delivery and Management*) que emprega *Hardware-in-the-loop* é implementado por intermédio das ferramentas RTDS (*Real Time Digital Power System*) e do simulador de redes OPNET. A efetividade do modelo de enfileiramento é demonstrada por meio de resultados analíticos relacionados ao atraso médio, obtidos por meio da análise de padrões de tráfego coletados do *testbed*. No entanto, o trabalho restringe-se a avaliar somente o atraso e não aborda métricas interessantes para aplicações em sistemas de potência, como a disponibilidade do canal de transmissão.

Lévesque e Maier (2014) introduziram um modelo para quantificação da dispo-

nibilidade probabilística de redes híbridas PON (*Passive optical Network*) e WiMAX (arquitetura conhecida como FiWi (*Fiber Wireless*)). O objetivo do modelo é computar a disponibilidade média da rede, baseado nas probabilidades de quebra de fibra e na probabilidade de falhas de estações base WiMAX. A modelagem proposta considera condições de tráfego saturado e não-saturado, empregando diferentes classes de tráfego para definição da matriz de conexões utilizada para gerar padrões de transmissão para teste. A avaliação do modelo proposto demonstra que ele é capaz de determinar a máxima taxa de dados a ser transmitido, para que os requisitos de disponibilidade exigidos por diferentes aplicações sejam alcançados. No entanto, o foco da análise é a infraestrutura de comunicação, sem contemplar serviço voltados ao gerenciamento elétrico, como o controle de tensão.

Sydney et al. (2013) apresentaram um estudo comparativo entre o MPLS (*Multiprotocol Label Switching*) e o protocolo OpenFlow, ambos aplicados para conectar os dispositivos de um sistema de transmissão. O objetivo do estudo é avaliar a performance do OpenFlow com relação ao atraso e volume de dados trafegados. O trabalho explora o potencial do OpenFlow, modelando as redes de potência e de comunicação nas ferramentas *Toolkit for Hybrid Systems Modeling & Evaluation* (THYME) e NS-3, respectivamente. Os resultados apresentados comprovam a aplicabilidade do OpenFlow para encaminhar dados entre os nós comunicantes do sistema. Porém, o trabalho foca na análise de performance do OpenFlow, abstraindo a tecnologia física para transmissão dos dados.

Feng et al. (2012) definiram um *framework* para transmissão de dados em sistemas de potência, baseado nas redes IP e Rede de Transporte Óptico (ou *Optical Transport Network*, OTN). O objetivo do *framework* é unificar as tecnologias IP e OTN para resolver os problemas das redes tradicionais MSTP (*Multiple Spanning Tree Protocol*) e DWDM. A proposta exhibe que o *framework* pode compor uma arquitetura capaz de alcançar os requisitos de transmissão típicos dos sistemas de potência atual. Porém, o *framework* descrito constitui-se como um modelo de alto nível e experimentações a nível de simulação não foram executadas.

Ibrahim e Salama (2015) propuseram uma técnica para controle de tensão baseada no despacho de potência reativa, projetada para ser integrada em sistemas de distribuição. O objetivo da técnica proposta é manter os níveis de tensão na faixa de funcionamento apropriado, minimizando as perdas e reduzindo o número das operações de comutação em bancos de capacitores e transformadores com tap variável. Unidades de processamento com capacidade de comunicação sem fio, baseadas na tecnologia WiMAX, são instaladas no sistema de distribuição simulado e trocam informações relacionadas às variáveis utilizadas para definir o ponto de operação do sistema, no intuito de auxiliar a coordenação das operações de controle. Testes são realizados avaliando as perdas de potência ativa do sistema, o custo das operações de comutação e a performance da rede em termos do atraso para execução dos procedimentos de regulação. Os resultados mostram que técnica

alcança os objetivos, limitando o número de operações de comutação. No entanto, aspectos relacionados a parametrização da rede WiMAX não são apresentados e as métricas de comunicação avaliadas restringem-se ao atraso e taxa média de pacotes entregues.

1.5 Considerações Finais

Neste capítulo foi descrito a importância do controle de magnitude de tensão, bem como foram apresentados os conceitos necessários para a execução dos procedimentos que visam manter as magnitudes de tensão na faixa de operação adequada, bem como o papel a ser desempenhado pela rede de dados. Foram listados itens que mostram a importância da comunicação para aprimorar o serviço de controle da tensão, fornecido pelas concessionárias de energia elétrica. Por fim, apresentou-se o padrão WiMAX e a formulação da análise a ser aplicada para demonstrar sua adequabilidade às características do tráfego de dados do sistema de potência.

2 Abordagem Proposta para o Controle da Magnitude de Tensão

Neste capítulo é apresentada a abordagem proposta para o controle da magnitude de tensão em sistemas de transmissão de energia elétrica, explicitando-se cada uma das metodologias desenvolvidas para a determinação da sequência de ajustes nas variáveis de controle.

2.1 Componentes da Abordagem

A abordagem proposta é formada pelos seguintes componentes (apresentados na Figura 1):

- Gestor de Controle: componente responsável por calcular o Fluxo de Carga, determinar as barras com tensões violadas e aplicar as Metodologias de Controle para definir a sequência de ajustes a ser executada para o redespacho de potência reativa;
- Nós de Controle: componente localizado nas barras de controle, responsável por processar os comandos de controle e alterar a injeção de potência reativa no sistema;
- Infraestrutura de Comunicação: componente responsável por intermediar a comunicação entre o Gestor de Controle e os Nós de Controle, transmitindo os valores das variáveis que caracterizam o ponto de operação atual da rede elétrica ao Gestor de Controle e os comandos de regulação aos Nós de Controle.

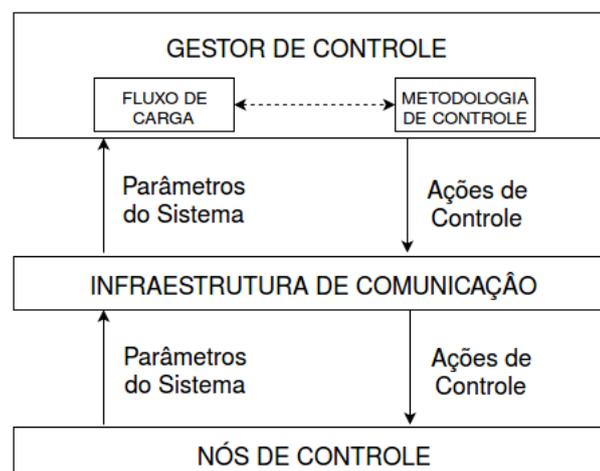


Figura 1 – Descrição dos componentes da abordagem.

A abordagem proposta considera duas Metodologias de Controle para definir os ajustes na geração de potência reativa a serem efetuados a cada iteração de controle. Uma iteração de controle consiste na execução do Fluxo de Carga, seguida pela determinação das tensões violadas e definição dos ajustes a serem efetuados. As ações de controle são transmitidas como uma sequência de comandos de regulação, por meio da Infraestrutura de Comunicação, até alcançar os dispositivos responsáveis por realizar fisicamente as atualizações na geração de potência reativa. Dessa forma, o trabalho colaborativo entre os três componentes da abordagem viabiliza a correção das violações das magnitudes de tensão.

2.2 Gestor de Controle

A operação de um sistema elétrico de potência requer o desenvolvimento de técnicas de controle apropriadas para permitir a entrega de energia elétrica aos consumidores em conformidade com padrões de segurança operacional (NIKNAM et al., 2013). Dessa forma, torna-se necessário apresentar a faixa adequada $[V^{min}, V^{max}]$ e a faixa de controle, que engloba valores de tensão abaixo de V^{min} e acima de V^{max} , conforme pode ser visto na Figura 2. Se as tensões nas barras de carga do sistema estiverem dentro da faixa de adequada, nenhuma ação de controle será realizada pela abordagem apresentada neste trabalho (pois a mesma foi desenvolvida para determinar a sequência de ajustes no controle da magnitude de tensão de barras de carga com magnitudes de tensão violadas). Caso a magnitude de tensão de uma barra i esteja fora da faixa adequada, isso significa que ela possui uma violação de tensão que deve ser corrigida. Ou seja, ajustes devem ser realizados no sistema e pode ser definido, por exemplo, que uma certa quantidade de potência reativa deve ser injetada ou absorvida em barras de controle para trazer a magnitude de tensão dessa barra i de volta à faixa adequada.

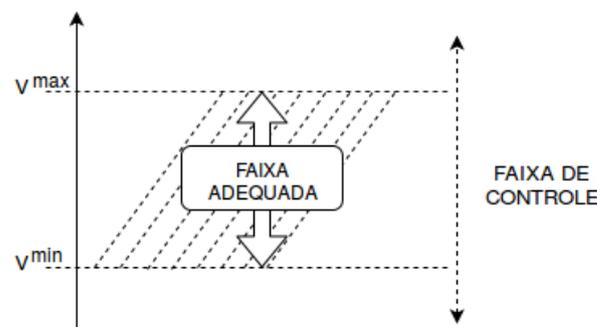


Figura 2 – Faixas adequada e de controle (CALDERARO et al., 2015)

Neste trabalho, os limites de tensão da faixa adequada são os definidos pelo ONS, o qual define que a magnitude de tensão em uma barra k (*em p.u.*) deve estar dentro da

faixa definida por $0.95 \leq V_k \leq 1.05$ (ONS, 2009). O Gestor de Controle (GC) calcula o Fluxo de Carga (com tap fixo) para determinar as magnitudes de tensão nas barras de carga do sistema. Caso haja magnitudes de tensão fora da faixa adequada, o GC aciona a abordagem de controle aqui proposta, que aplica uma análise de sensibilidade (efetuada com base na matriz J_{QV}) e define o subconjunto ρ bem como o vetor ΔV_G (que consiste nos ajustes nas magnitudes de tensão aplicados às barras de controle a fim de produzir o despacho de potência reativa).

Para execução dessas tarefas, o GC faz uso de conhecimento associado à estrutura do sistema de transmissão de energia elétrica, ou seja, os parâmetros e a topologia da rede elétrica devem ser conhecidos. Adicionalmente, é necessário que o GC determine o quanto uma determinada barra de controle pode influenciar a variação da magnitude de tensão de uma barra de carga, informação obtida por meio da matriz J_{QV} .

Todas as informações que definem a base de conhecimento do GC são obtidas por meio da sua interação com o Fluxo de Carga e são utilizadas para determinar quais as operações a serem executadas a cada iteração de controle. Posto isso, o GC pode ser visualizado como o componente que gerencia o funcionamento da abordagem, determinando se existem barras com violação de tensão e aplicando as metodologias de controle para estabelecer o conjunto de ajustes que são traduzidos em uma sequência de mensagens a serem enviadas aos Nós de Controle por intermédio da Infraestrutura de Comunicação.

2.2.1 Definição das Metodologias de Controle

O funcionamento das metodologias de controle é baseado na matriz Jacobiana reduzida (J_{QV}), a qual é obtida a partir da matriz Jacobiana $J(\theta, V)$ das equações de balanço de potência (1.1) e (1.2) (LAGE; FERNANDES; COSTA, 2013) para todas as barras do sistema. Essas equações de balanço podem ser aproximadas linearmente por (2.1).

$$\begin{bmatrix} \Delta P(\theta, V) \\ \Delta Q(\theta, V) \end{bmatrix} = J(\theta, V) \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Para encontrar a relação entre variações nas injeções de potência reativa com variações nas magnitudes de tensão, desconsidera-se que as injeções de potência ativa variem, ou seja, $\Delta P(\theta, V) = 0$ (LÖF et al., 1992).

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \Delta Q(\theta, V) \end{bmatrix} = J(\theta, V) \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Considerando que:

$$J(\theta, V) = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix}, \quad (2.3)$$

onde

$$J_1 = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_1}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial P_1}{\partial \theta_{N_G}} \\ \frac{\partial P_2}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_2}{\partial \theta_1} & \cdots & \frac{\partial P_2}{\partial \theta_{N_G}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_{N_G}}{\partial \theta_N} & \frac{\partial P_{N_G}}{\partial \theta_{N_G}} & \cdots & \frac{\partial P_{N_G}}{\partial \theta_{N_G}} \end{bmatrix}, \quad (2.4)$$

$$J_2 = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial V_1} & \frac{\partial P_1}{\partial V_2} & \cdots & \frac{\partial P_1}{\partial V_N} \\ \frac{\partial P_2}{\partial V_1} & \frac{\partial P_2}{\partial V_1} & \cdots & \frac{\partial P_2}{\partial V_N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_{N_G}}{\partial V_N} & \frac{\partial P_{N_G}}{\partial V_N} & \cdots & \frac{\partial P_{N_G}}{\partial V_N} \end{bmatrix}, \quad (2.5)$$

$$J_3 = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_N} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_1} & \cdots & \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_N}{\partial \theta_N} & \frac{\partial Q_N}{\partial \theta_N} & \cdots & \frac{\partial Q_N}{\partial \theta_N} \end{bmatrix}, \quad (2.6)$$

e

$$J_4 = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_1}{\partial V_1} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_2} & \cdots & \frac{\partial Q_1}{\partial V_N} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial V_1} & \frac{\partial Q_2}{\partial V_1} & \cdots & \frac{\partial Q_2}{\partial V_N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_N}{\partial V_N} & \frac{\partial Q_N}{\partial V_N} & \cdots & \frac{\partial Q_N}{\partial V_N} \end{bmatrix}, \quad (2.7)$$

a redução de (2.2) em termos de ΔQ e ΔV resulta em:

$$\Delta Q = [J_4 - (J_3 J_1^{-1} J_2)] \Delta V. \quad (2.8)$$

Dessa forma, tem-se que:

$$J_{QV} = J_4 - (J_3 J_1^{-1} J_2), \quad (2.9)$$

Portanto, a partir de (2.8) tem-se que a matriz J_{QV} relaciona variações nas injeções de potência reativa com variações nas magnitudes das barras com violação de tensão.

Após o cálculo do Fluxo de Carga pelo GC, as magnitudes e os ângulos de fase das tensões da rede elétrica são conhecidos e a matriz J_{QV} pode ser calculada. Com essas informações a Metodologia de Controle em execução determina o conjunto de barras de

controle (ρ) a ser ajustado caso exista violações de tensão. O conjunto ρ é definido com base na barra de carga i que possui a maior violação de tensão. Dessa forma, incrementa-se a tensão das barras do conjunto ρ , caso i esteja em subtensão, ou decrementa-se as tensões se houver sobretensão. Assim, é possível, injetar ou absorver potência reativa na rede, conforme as violações de tensão.

Inicialmente, calculam-se os desvios de tensão para as barras do conjunto PQ de acordo com (2.10) e, em seguida, estima-se a variação na geração de potência reativa aplicada a cada uma das barras do conjunto ρ no intuito de corrigir os desvios de tensão, conforme (2.11). Entretanto, como a variação de potência reativa é produzida variando-se a magnitude de tensão nas barras de controle, determina-se o quanto variar na magnitude da tensão das barras do conjunto ρ a fim de se injetar a quantidade de potência reativa desejada de acordo com (2.12). Portanto, para um sistema com N barras, o vetor ΔV_C possui dimensão N , no entanto, as posições do vetor que possuem valores diferentes de zero correspondem àquelas cujos índices referem-se às barras PQ . Em contrapartida, os vetores ΔQ e ΔV_G armazenam valores não nulos nas posições que estão relacionadas às barras PV .

$$\Delta V_{C_i} = \begin{cases} V_i - V^{max}, & \text{se } V_i > V^{max} \\ V^{min} - V_i, & \text{se } V_i < V^{min} \end{cases}, \quad i = 1, 2, \dots, N_{PQ} \quad (2.10)$$

$$\Delta Q = J_{QV} \Delta V_C \quad (2.11)$$

$$\Delta V_G = J_{QV}^{-1} \Delta Q \quad (2.12)$$

As duas metodologias de determinação da sequência de ajustes no controle da magnitude de tensão são aqui apresentadas para corrigir as violações de tensão nas barras de carga de um sistema de transmissão de energia elétrica, e todas recebem como entrada os vetores ΔV_C e ΔQ , calculados de acordo com (2.10) e (2.11), e a matriz J_{QV} , calculada de acordo com (2.9).

A primeira delas, denominada MaxQ e descrita no Algoritmo 1, determina as maiores variações nas injeções de potência reativa ΔQ que devem ser injetadas individualmente pelas barras de controle para corrigir as violações de tensão ΔV_C nas barras de carga. No Algoritmo 1, a metodologia MaxQ inicialmente determina a barra i que possui a maior violação de tensão (Passo 2) e, em seguida, a barra de geração j com a maior variação de injeção de potência reativa é estimada por $\max(\Delta Q)$ (Passo 3). O vetor dos incrementos nas magnitudes de tensão nas barras de controle ΔV_G é calculado no (Passo 4). O ajuste na magnitude de tensão da barra de controle j , responsável pela maior injeção de potência reativa ΔQ_j no sentido de eliminar a violação de tensão ΔV_{C_i} , é dado por ΔV_{G_j} . Posto

isso, a metodologia MaxQ pode ser aplicada desde que a barra j possa gerar uma grande quantidade da potência reativa.

Algorithm 1 Metodologia MaxQ

```

1: function MAXQ( $\Delta V_C$ ,  $\Delta Q$ ,  $J_{QV}$ )
2:    $i \leftarrow \max(\Delta V_C)$ 
3:    $j \leftarrow \max(\Delta Q)$ 
4:    $\Delta V_G \leftarrow J_{QV}^{-1} \Delta Q_j$ 
5:   return  $\Delta V_{G_j}$ 
6: end function

```

Aplica-se ainda os índices de sensibilidade obtidos por meio da matriz J_{QV}^{-1} , e com esta informação estabelece-se a metodologia VSF (*Voltage Sensitivity Factor*) (SESHADRI; PATTON, 1999), apresentada no Algoritmo 2. A metodologia inicialmente determina a barra i que possui a maior violação de tensão (Passo 2). Em seguida, a matriz com os índices de sensibilidade S é computada (Passo 3). A barra j é aquela cujo índice de sensibilidade da i -ésima coluna de S tiver o maior valor absoluto (Passo 4). Então, calcula-se o ajuste na magnitude de tensão ΔV_{G_j} para ser realizado o despacho de potência reativa necessário para levar as magnitudes de tensão de volta à faixa adequada (Passo 5). A metodologia VSF determina a barra de controle a ser ajustada com base no índice de sensibilidade obtido por meio da matriz J_{QV}^{-1} , que indica o quanto a variação da injeção da potência reativa em uma determinada barra de controle altera as magnitudes de tensão nas barras controladas. Portanto, também define qual controle produzirá a maior variação na magnitude de tensão de uma barra a ser controlada.

Algorithm 2 Metodologia VSF

```

1: function VSF( $\Delta V_C$ ,  $\Delta Q$ ,  $J_{QV}$ )
2:    $i \leftarrow \max(\Delta V_C)$ 
3:    $S \leftarrow J_{QV}^{-1}$ 
4:    $j \leftarrow \max(S[\dots, i])$ 
5:    $\Delta V_G \leftarrow J_{QV}^{-1} \Delta Q_j$ 
6:   return  $\Delta V_{G_j}$ 
7: end function

```

Apresentadas as metodologias de determinação da sequência dos ajustes nos controles, apresenta-se agora o funcionamento da abordagem proposta e sua interação com as metodologias de controle. Assim, no Algoritmo 3 são descritas as operações executadas pela abordagem independentemente da metodologia a ser aplicada. Inicialmente, são determinadas as violações de tensão para todas as barras de carga i (Passos 1 a 3). Em seguida, a variação de potência reativa é calculada (Passo 4). A metodologia de controle é executada (Passos 5 a 18) de acordo com o valor da variável *metodologia_de_controle*

(que identifica a metodologia a ser aplicada). As magnitudes de tensão de cada uma das N_ρ barras do conjunto ρ (Passos 19 a 21) são, então, ajustadas.

Algorithm 3 Descrição da Abordagem de Controle da Magnitude de Tensão Proposta

```

1: for  $i \leftarrow 1$  until  $N_{PQ}$  do                                ▷ Para todas as barras de carga.
2:    $\Delta V_{C_i}[i] \leftarrow |V_{C_i}[i] - V_{lim.viol.}|$ 
3: end for
4:  $\Delta Q_j \leftarrow J_{QV} \Delta V_C$ 
5: switch metodologia_de_controle do
6:   case 0:
7:      $\Delta V_{G_j} \leftarrow \text{MaxQ}(\Delta V_C, \Delta Q, J_{QV})$ 
8:     break
9:   end case
10:  case 1:
11:     $\Delta V_{G_j} \leftarrow \text{VSF}(\Delta V_C, \Delta Q, J_{QV})$ 
12:    break
13:  end case
14: end switch
15: for  $n \leftarrow 1$  until  $N_\rho$  do                                ▷ Para todas as barras de controle a serem ajustadas.
16:    $V_{G_j}[n] \leftarrow V_{G_j}[n] + \Delta V_{G_j}[n]$ 
17: end for

```

2.3 Nós de Controle

Os Nós de Controle (NC) são os componentes que atuam diretamente nas barras de controle do sistema, são equipados com transceptores habilitados para comunicação de dados e são ativados ao receber mensagens enviadas pelo GC, as quais são transmitidas pela Infraestrutura de Comunicação.

A tarefa executada por um NC é determinada pela metodologia de controle em operação. O NC recebe essa informação como um comando e executa o ajuste na magnitude de tensão no gerador conectado à barra. Após executar a operação de controle, o NC registra a ação executada, uma vez que esta informação torna-se importante para realização de análises sobre o funcionamento da abordagem, com o intuito de comparar o quanto de potência foi realmente injetado e a quantidade que foi estimada a ser gerada. A Figura 3 apresenta a estrutura de um NC, que é composto por uma interface de comunicação WiMAX e seus parâmetros, um gerenciador elétrico (armazenando as grandezas elétricas) e a aplicação para tratar as mensagens recebidas.

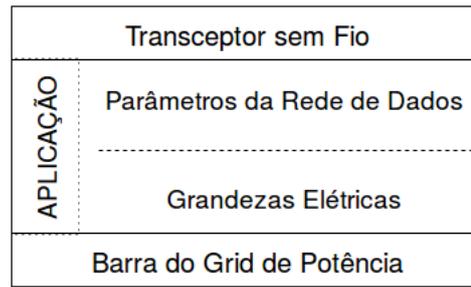


Figura 3 – Estrutura de um NC.

2.4 Infraestrutura de Comunicação

A Infraestrutura de Comunicação (IC) é responsável por conectar cada um dos componentes do sistema elétrico e servir de interface entre o GC e os NC. Os parâmetros da IC incluem:

1. Comunicação baseada na transmissão de pacotes por meio da pilha TCP/IP (KUROSE et al., 2010);
2. Utilização da tecnologia de comunicação sem fio WiMAX;
3. Definição da faixa de cobertura das estações base, tipo de modulação e espectro de banda a ser utilizado em concordância com a topologia da rede de energia elétrica, respeitando as distâncias entre as barras.

Cada uma das unidades da IC é denominada nó e podem ser de dois tipos: Nós de Comutação e Nós Finais. O primeiro tipo compreende dispositivos cuja única função é encaminhar mensagens entre a origem e o destino dos pacotes. Os Nós de Comutação funcionam como repetidores. Isto é, recebem um pacote e retransmitem este pelo canal sem fio de *Uplink* alocado. O último refere-se aos dispositivos instalados junto ao GC e os NC, sendo responsáveis por iniciar a transmissão de pacotes, bem como por executar processamentos com base nas mensagens que lhes forem endereçadas.

2.5 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados detalhes da abordagem proposta para o controle da magnitude de tensão e seus componentes. O capítulo descreveu a interação entre os componentes de forma a elucidar como eles colaboram para definir a sequência de ajustes no redespacho de potência reativa para a eliminação de violações nas magnitudes de tensão nas barras de carga de um sistema de transmissão. Foi explicitado também como a troca de dados entre o GC e os NCs possibilita a execução de ajustes nas injeções de potência reativa.

3 Resultados e Discussão

Neste capítulo são apresentados os resultados relacionados à aplicação da abordagem para a determinação da sequência de ajustes no controle da magnitude de tensão em sistemas de transmissão de energia elétrica. Os resultados obtidos fornecem o despacho de potência reativa necessário para a correção das violações de tensão, os perfis de tensão nas barras e as perdas de potência ativa no sistema à medida que os ajustes são realizados. Adicionalmente, os resultados descrevem as métricas relativas ao tráfego de dados (atraso e volume) e a análise de disponibilidade, caracterizada pelo descarte de pacotes e probabilidade de falhas de transmissão de dados.

3.1 Considerações Iniciais

Com o objetivo de verificar o funcionamento da abordagem proposta, foi desenvolvido um módulo computacional no simulador NS-3 (FONTES et al., 2014) para o cálculo do Fluxo de Carga e definição da sequência de ajustes nas variáveis de controle do sistema. O Fluxo de Carga implementado usa o método de Newton-Raphson para calcular o estado da rede elétrica, sendo constituído por um grupo de classes, exemplos e testes. Dessa forma, é possível reutilizar o Fluxo de Carga com os demais módulos existentes no simulador NS-3.

Um simulador consiste em um software capaz de reproduzir e simular o comportamento de um sistema, apresentando como principal vantagem a possibilidade de se ter um método fácil e barato para avaliar a qualidade de novas abordagens de resolução de problemas práticos. Muitos softwares aplicados à simulação são proprietários, apresentando condições de uso limitada e custo de licença. No entanto, há algumas soluções gratuitas para simulação e que podem ser facilmente estendidas, permitindo a adição de módulos para atender às necessidades específicas de determinadas aplicações, e este é o caso do NS-3 (licenciado com a licença GNU – *General Public License*).

De acordo com Henderson et al. (2008), o emprego de um simulador para construir os cenários de teste é justificado pelo fato de a implementação de um serviço aplicado a um sistema de potência ser complexo, ainda mais quando se consideram as restrições associadas às interações entre a transmissão de potência e as tecnologias para comunicação de dados. A aplicação de ferramentas de simulação permite a reutilização de protocolos e padrões aplicados pela comunidade científica, agilizando o processo de desenvolvimento de protótipos. Dessa forma, a utilização de um simulador restringe o foco de trabalho apenas aos fatores que podem influenciar a qualidade da solução proposta.

3.2 Descrição dos Cenários de Teste

No intuito de avaliar a aplicação da abordagem proposta para o controle da magnitude de tensão, são apresentados os cenários operacionais com violações de magnitude de tensão. A determinação desses cenários é feita por meio de alterações nas magnitudes de tensão das barras do conjunto G e/ou modificando-se o carregamento do sistema. Todas as simulações são realizadas para os sistemas IEEE de 14 e 57 barras em um ambiente construído na ferramenta NS-3 e o GC para ambos os sistemas foi posicionado na barra 2. Para avaliar a eficácia da abordagem proposta, os seguintes resultados são apresentados:

- redespacho de potência reativa para eliminar violações de tensão;
- ajustes nas magnitudes de tensão nas barras de controle;
- perdas de potência ativa no sistema à medida que os ajustes são realizados;
- tempo necessário para encaminhar os ajustes de controle definidos pelo GC, que devem ser executados pelos NCs e o volume de dados trafegado na rede.

3.2.1 Cenário de Teste 1 (CT-1)

O sistema IEEE de 14 barras representa uma porção do sistema elétrico localizado na Região Centro-Oeste dos Estados Unidos (WOGGIN; GAYME, 2014). O sistema é apresentado na Figura 4, caracterizado pelo conjunto de barras de controle $G = \{1, 2, 3, 6, 8\}$ e pelo conjunto de barras de carga $PQ = \{4, 5, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14\}$.

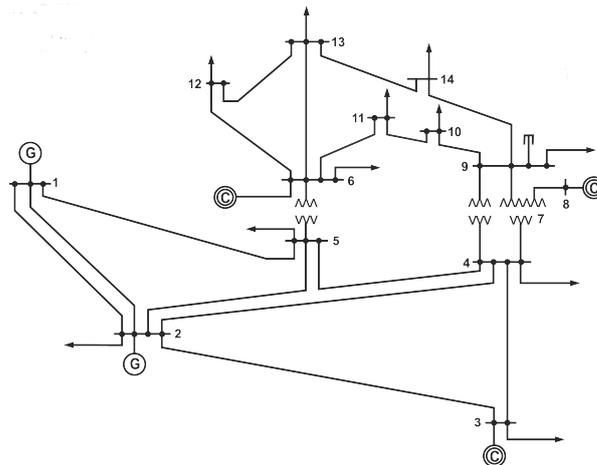


Figura 4 – Sistema de 14 barras.

Na Tabela 1 são apresentadas as grandezas ($V_k, \theta_k, P_{C_k}, Q_{C_k}, P_{G_k}, Q_{G_k}$) que caracterizam as barras do sistema, antes da execução do Fluxo de Carga, para o CT-1. A Tabela 2 apresenta os limites de geração de potência reativa deste sistema.

Tabela 1 – Dados do CT-1

Barra (k)	V_k (p.u.)	θ_k (graus)	P_{C_k} (MW)	Q_{C_k} (MVar)	P_{G_k} (MW)	Q_{G_k} (MVar)
1	1,025	0	0	0	-	-
2	1,015	-	25,389	13,97	40	-
3	1,01	-	110,214	20,9	0	-
4	-	-	55,926	-4,29	0	0
5	-	-	8,892	1,76	0	0
6	1,002	-	13,104	8,25	0	-
7	-	-	0	0	0	0
8	1,02	-	0	0	0	-
9	-	-	34,515	18,26	0	0
10	-	-	10,53	6,38	0	0
11	-	-	4,095	1,98	0	0
12	-	-	7,137	1,76	0	0
13	-	-	15,795	6,38	0	0
14	-	-	17,433	5,5	0	0

Tabela 2 – Limites de Geração de Potência Reativa para o Sistema de 14 Barras

Barra (k)	$Q_{G_k}^{min}$ (MVar)	$Q_{G_k}^{max}$ (MVar)
2	-40	50
3	0	40
6	-6	24
8	-6	24

A partir dos dados mostrados na Tabela 1), o GC executa os procedimentos computacionais para resolução do Fluxo de Carga, de modo a determinar as informações relativas ao ponto de operação da rede elétrica (Tabela 3). Baseado na Tabela 3, pode-se perceber que a barra 14 apresenta uma magnitude de tensão ($V_{14} = 0,944248$) inferior ao limite mínimo ($V_{14}^{min} = 0,95$). Portanto, o GC precisa definir uma sequência de ajustes a serem executados nos geradores, de modo a conduzir a magnitude de tensão da barra 14 para dentro da faixa de valores adequada $[0,95; 1,05]$. Para determinar a sequência de ajustes, o GC pode aplicar uma das duas metodologias de controle implementadas. Por meio das metodologias de controle define-se o conjunto de barras a serem ajustadas no intuito de corrigir a violação da magnitude de tensão na barra 14.

Pela análise das Tabelas 2 e 3, pode-se perceber que as barras de controle 2 e 3 atingiram o limite superior de geração de potência reativa e perderam seu próprio controle de magnitude de tensão. Portanto, as barras 2 e 3 estão impossibilitadas de injetar

Tabela 3 – Ponto de Operação após a Resolução do Fluxo de Carga para o CT-1 (Caso Base)

Barra (k)	V_k (p.u.)	θ_k (graus)	P_{C_k} (MW)	Q_{C_k} (MVar)	P_{G_k} (MW)	Q_{G_k} (MVar)
1	1,025	0	0	0	284,297	8,5837
2	0,996441	-6,4785	25,389	13,97	40	50
3	0,957282	-16,6958	110,214	20,9	0	40
4	0,954177	-13,268	55,926	-4,29	0	0
5	0,95909	-11,3064	8,892	1,76	0	0
6	1,00265	-18,7964	13,104	8,25	0	24
7	0,980992	-17,2805	0	0	0	0
8	1,02	-17,2805	0	0	0	22,5877
9	0,961375	-19,4214	34,515	18,26	0	0
10	0,959484	-19,7019	10,53	6,38	0	0
11	0,976453	-19,4124	4,095	1,98	0	0
12	0,982599	-19,9498	7,137	1,76	0	0
13	0,974933	-20,0193	15,795	6,38	0	0
14	0,944694	-21,0923	17,433	5,5	0	0

potência reativa para esse ponto de operação e o conjunto G fica reduzido às barras 1, 6 e 8 ($G = \{1, 6, 8\}$).

3.2.1.1 Correção do CT-1 pela Metodologia MaxQ

Após a determinação do ponto de operação da rede elétrica e com a variável *metodologia_de_controle* configurada com valor igual a 0, o GC executa os procedimentos computacionais da metodologia MaxQ, conforme definidos nos Algoritmos 1 e 3, com o intuito de definir a sequência de ajustes a serem executados. A metodologia MaxQ determina que apenas uma barra do conjunto G deve ser operada a cada iteração de controle. Assim, o conjunto ρ é unitário e a barra é escolhida em função da máxima variação de injeção de potência reativa. Conforme pode ser visto na Tabela 4, a barra 1 possui a maior variação de potência reativa e, portanto, é a barra escolhida para ser ajustada nesta iteração.

Tabela 4 – Variação da Injeção de Potência Reativa na Iteração 1 da Metodologia MaxQ para O CT-1

Barra	$\Delta Q^{(1)}$
1	0,227948
6	0,208397
8	0

Para realizar o redespacho de potência reativa pela barra 1, o nó final instalado no GC deve realizar a transmissão de pacotes, por meio da tecnologia de comunicação

sem fio WiMAX, contendo a ação de controle a ser executada. O nó final instalado no NC conectado à barra 1 recebe os pacotes relativos à primeira iteração de controle em 84 ms (tempo necessário para encaminhar o pacote do GC, localizado na barra 2, até a barra 1). Nesse instante, o NC processa os pacotes recebidos e efetua a alteração no despacho de potência reativa da barra 1.

Para realizar a alteração na geração de potência reativa, a magnitude de tensão da barra 1 é incrementada para o valor de 1,03506 ($V_1 = 1,03506$). Após esse incremento, o GC executa o Fluxo de Carga para determinar o novo ponto de operação do sistema. O novo ponto de operação resultante da execução do ajuste de controle pela barra 1 é apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Ponto de Operação do CT-1 após Iteração 1 da Metodologia MaxQ

Barra (k)	V_k (p.u.)	θ_k (graus)	P_{C_k} (MW)	Q_{C_k} (MVar)	P_{G_k} (MW)	Q_{G_k} (MVar)
1	1,03506	0	0	0	283,932	12,7637
2	1,00515	-6,32778	25,389	13,97	40	50
3	0,965122	-16,3644	110,214	20,9	0	40
4	0,960661	-12,9672	55,926	-4,29	0	0
5	0,965678	-11,032	8,892	1,76	0	0
6	1,002	-18,4357	13,104	8,25	0	19,8446
7	0,983826	-16,959	0	0	0	0
8	1,02	-16,959	0	0	0	20,9467
9	0,963977	-19,0975	34,515	18,26	0	0
10	0,961533	-19,372	10,53	6,38	0	0
11	0,977186	-19,0692	4,095	1,98	0	0
12	0,982187	-19,5901	7,137	1,76	0	0
13	0,974757	-19,6652	15,795	6,38	0	0
14	0,946121	-20,7513	17,433	5,5	0	0

Por meio da Tabela 5 percebe-se que a barra 14 ainda apresenta magnitude de tensão inferior ao limite mínimo, ou seja, o sistema ainda possui violação de tensão. Portanto, torna-se necessário executar outra ação de controle. Por meio da Tabela 6, percebe-se que a barra 1 possui a maior estimativa de variação na geração de potência reativa. Assim, a metodologia MaxQ determina que a ação de controle deve ser executada novamente pela barra 1.

Tabela 6 – Variação de Injeção de Potência Reativa na Iteração 2 da Metodologia MaxQ para o CT-1

Barra	$\Delta Q^{(2)}$
1	0,156782
6	0,140919
8	0

Para realizar o redespacho na barra 1, o nó final instalado no GC realiza a transmissão, por meio da tecnologia de comunicação sem fio WiMAX, dos pacotes contendo a ação de controle a ser executada. O nó final instalado no NC conectado à barra 1 recebe os pacotes relativos à segunda iteração de controle em 96 *ms*. Nesse instante, o NC processa os pacotes recebidos e efetua a alteração no despacho de potência reativa da barra 1.

Para realizar a alteração na geração de potência reativa, a magnitude de tensão da barra 1 é incrementada para o valor de 1,04511 ($V_1 = 1,04511$). Após o incremento, o GC executa o Fluxo de Carga para determinar o novo ponto de operação. O novo ponto de operação resultante da execução da ação de controle na barra 1 é apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Ponto de Operação do CT-1 após Iteração 2 da Metodologia MaxQ

Barra (k)	V_k (p.u.)	θ_k (graus)	P_{C_k} (MW)	Q_{C_k} (MVar)	P_{G_k} (MW)	Q_{G_k} (MVar)
1	1,04511	0	0	0	283,59	16,8462
2	1,0139	-6,18212	25,389	13,97	40	50
3	0,973057	-16,0412	110,214	20,9	0	40
4	0,967289	-12,6749	55,926	-4,29	0	0
5	0,972425	-10,7668	8,892	1,76	0	0
6	1,002	-18,0838	13,104	8,25	0	15,9967
7	0,98683	-16,6427	0	0	0	0
8	1,02	-16,6427	0	0	0	19,2073
9	0,966865	-18,7767	34,515	18,26	0	0
10	0,963934	-19,0456	10,53	6,38	0	0
11	0,978417	-18,7317	4,095	1,98	0	0
12	0,982407	-19,2377	7,137	1,76	0	0
13	0,97519	-19,3176	15,795	6,38	0	0
14	0,947985	-20,4136	17,433	5,5	0	0

Por meio da Tabela 7 percebe-se que a barra 14 ainda apresenta sua magnitude de tensão abaixo do limite mínimo, ou seja, o sistema de transmissão ainda possui violação de tensão. Portanto, torna-se necessário executar outra ação de controle. Por meio da

Tabela 8 percebe-se que a barra 1 possui a maior estimativa de variação na geração de potência reativa. Assim, a metodologia MaxQ determina que a ação de controle deve ser executada pela barra 1.

Tabela 8 – Variação de Injeção de Potência Reativa na Iteração 3 da Metodologia MaxQ

Barra	$\Delta Q^{(3)}$
1	0,083182
6	0,0735263
8	0

Para realizar o redespacho na barra 1, o nó final instalado no GC realiza a transmissão, por meio da tecnologia de comunicação sem fio WiMAX, dos pacotes contendo a ação de controle a ser executada. O nó final instalado no NC conectado à barra 1 recebe os pacotes relativos à terceira iteração de controle em 108 *ms* (apesar do pacote ter sido transmitido para o mesmo NC da iteração anterior, houveram oscilações no canal de transmissão). Nesse instante, o NC processa os pacotes recebidos e efetua a alteração no despacho de potência reativa da barra 1.

Para realizar a alteração na geração de potência reativa, a magnitude de tensão da barra 1 é incrementada para o valor de 1,05 ($V_1 = 1,05$). Após o incremento, o GC executa o Fluxo de Carga para determinar o novo ponto de operação. O novo ponto de operação resultante da execução da ação de controle na barra 1 é apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 – Ponto de Operação do CT-1 após Iteração 3 da Metodologia MaxQ

Barra (k)	V_k (p.u.)	θ_k (graus)	P_{C_k} (MW)	Q_{C_k} (MVar)	P_{G_k} (MW)	Q_{G_k} (MVar)
1	1,05	0	0	0	283,433	18,8792
2	1,01815	-6,11277	25,389	13,97	40	50
3	0,976903	-15,8872	110,214	20,9	0	40
4	0,970503	-12,5355	55,926	-4,29	0	0
5	0,975697	-10,6405	8,892	1,76	0	0
6	1,002	-17,9158	13,104	8,25	0	14,1311
7	0,988286	-16,4919	0	0	0	0
8	1,02	-16,4919	0	0	0	18,3639
9	0,968265	-18,6238	34,515	18,26	0	0
10	0,965098	-18,89	10,53	6,38	0	0
11	0,979014	-18,5708	4,095	1,98	0	0
12	0,982514	-19,0696	7,137	1,76	0	0
13	0,975399	-19,1517	15,795	6,38	0	0
14	0,948889	-20,2526	17,433	5,5	0	0

Após o terceiro ajuste a barra 14 ainda está com violação na magnitude de tensão conforme pode ser visto na Tabela 9. Portanto, torna-se necessário executar outra ação de controle. Por meio da Tabela 8, percebe-se que a barra 1 possui a maior estimativa na variação da geração de potência reativa, no entanto, a barra 1 já atingiu o seu limite superior de magnitude de tensão ($V_1 = 1,05$) e não pode ser mais ajustada. Portanto, a metodologia MaxQ determina que a ação de controle deve ser executada pela barra 6.

Tabela 10 – Variação de Injeção de Potência Reativa na Iteração 4 da Metodologia MaxQ

Barra	$\Delta Q^{(4)}$
1	0,083182
6	0,040637
8	0

Para realizar o redespacho na barra 6, o nó final instalado no GC realiza a transmissão, por meio da tecnologia de comunicação sem fio WiMAX, dos pacotes contendo a ação de controle a ser executada. O nó final instalado no NC conectado à barra 6 recebe os pacotes relativos à terceira iteração de controle em 272 *ms*. Nesse instante, o NC processa os pacotes recebidos e efetua a alteração no despacho de potência reativa da barra 6.

Para realizar a alteração na geração de potência reativa, a magnitude de tensão da barra 6 é incrementada para o valor de 1,012 ($V_6 = 1,012$). Após o incremento, o GC executa o Fluxo de Carga para determinar o novo ponto de operação. O novo ponto de operação resultante da execução da ação de controle na barra 6 é apresentado na Tabela 11.

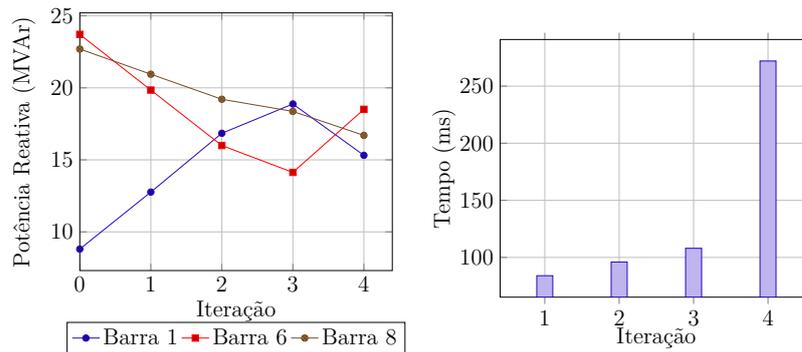
Tabela 11 – Ponto de Operação do CT-1 após Iteração 4 da Metodologia MaxQ

Barra (k)	V_k (p.u.)	θ_k (graus)	P_{C_k} (MW)	Q_{C_k} (MVar)	P_{G_k} (MW)	Q_{G_k} (MVar)
1	1,05	0	0	0	283,366	15,3154
2	1,01945	-6,12231	25,389	13,97	40	50
3	0,979051	-15,8639	110,214	20,9	0	40
4	0,973264	-12,5351	55,926	-4,29	0	0
5	0,97867	-10,6634	8,892	1,76	0	0
6	1,012	-17,9063	13,104	8,25	0	18,5081
7	0,991161	-16,4349	0	0	0	0
8	1,02	-16,4349	0	0	0	16,6993
9	0,972912	-18,5322	34,515	18,26	0	0
10	0,970743	-18,8048	10,53	6,38	0	0
11	0,986826	-18,5168	4,095	1,98	0	0
12	0,992289	-19,0371	7,137	1,76	0	0
13	0,984836	-19,1077	15,795	6,38	0	0

14	0,955788	-20,1616	17,433	5,5	0	0
----	-----------------	----------	--------	-----	---	---

Por meio da Tabela 11 percebe-se que a violação de tensão da barra 14 foi corrigida e o sistema de transmissão encontra-se com valores adequados de tensão em todas as barras.

A Figura 5 ilustra o despacho de potência reativa nas barras de controle durante as quatro iterações da metodologia de controle executadas para correção da violação de tensão na barra 14. Nas iterações 1 a 3, a barra 1 foi selecionada pela metodologia MaxQ para injetar potência reativa. Entretanto, a violação de tensão na barra 14 não foi totalmente corrigida e por isso, foi necessária a execução de mais uma ação de controle. Na iteração 4, a barra 6 foi selecionada pela metodologia MaxQ para injetar potência reativa no sistema. A tensão da barra 6 foi, então, incrementada, injetando potência reativa no sistema e corrigindo a violação de tensão na barra 14.



(a) Geração de potência reativa. (b) Tempo para execução do redespacho.

Figura 5 – Geração de Potência Reativa da metodologia MaxQ para o CT-1

3.2.1.2 Correção do CT-1 pela metodologia VSF

Após a determinação do ponto de operação da rede elétrica e com a variável *metodologia_de_controle* configurada com valor igual a 1, o GC executa os procedimentos computacionais da metodologia VSF, conforme definidos nos Algoritmos 2 e 3, com o intuito de definir a sequência de ajustes a serem executados. A metodologia VSF determina que apenas uma barra do conjunto G deve ser operada a cada iteração de controle. Assim, o conjunto ρ é unitário e a barra é escolhida em função do máximo valor do índice de sensibilidade. Conforme pode ser visto na Tabela 12, a barra 1 possui o maior valor do índice de sensibilidade e, portanto, é a barra escolhida para ser ajustada nesta iteração.

Tabela 12 – Índices de Sensibilidade na Iteração 1 da Metodologia VSF

Barra	$S[\dots, 14]^{(1)}$
1	0,170427
6	0,0732026
8	0,105262

Para realizar o redespacho de potência reativa pela barra 1, o nó final instalado no GC deve realizar a transmissão de pacotes, por meio da rede WiMAX, contendo a ação de controle a ser executada. O nó final instalado no NC conectado à barra 1 recebe os pacotes relativos à primeira iteração de controle em 84 *ms*. Nesse instante, o NC processa os pacotes recebidos e efetua a alteração no despacho de potência reativa da barra 1.

Para realizar a alteração na geração de potência reativa, a magnitude de tensão da barra 1 é incrementada para o valor de 1,03506 ($V_1 = 1,03506$). Após esse incremento, o GC executa o Fluxo de Carga para determinar o novo ponto de operação do sistema. O novo ponto de operação resultante da execução do ajuste de controle pela barra 1 é apresentado na Tabela 13.

Tabela 13 – Ponto de Operação do CT-1 após Iteração 1 da Metodologia VSF

Barra (k)	V_k (p.u.)	θ_k (graus)	P_{C_k} (MW)	Q_{C_k} (MVar)	P_{G_k} (MW)	Q_{G_k} (MVar)
1	1,03506	0	0	0	283,932	12,7637
2	1,00515	-6,32778	25,389	13,97	40	50
3	0,965122	-16,3644	110,214	20,9	0	40
4	0,960661	-12,9672	55,926	-4,29	0	0
5	0,965678	-11,032	8,892	1,76	0	0
6	1,002	-18,4357	13,104	8,25	0	19,8446
7	0,983826	-16,959	0	0	0	0
8	1,02	-16,959	0	0	0	20,9467
9	0,963977	-19,0975	34,515	18,26	0	0
10	0,961533	-19,372	10,53	6,38	0	0
11	0,977186	-19,0692	4,095	1,98	0	0
12	0,982187	-19,5901	7,137	1,76	0	0
13	0,974757	-19,6652	15,795	6,38	0	0
14	0,946121	-20,7513	17,433	5,5	0	0

Por meio da Tabela 13 percebe-se que a barra 14 ainda apresenta sua magnitude de tensão abaixo do limite mínimo, ou seja, o sistema de transmissão ainda possui violação de tensão. Portanto, torna-se necessário executar outra ação de controle. Baseado no ponto de

operação após o ajuste na magnitude de tensão da barra 1, verifica-se que o conjunto das barras de controle aptas a realizarem o redespacho de potência fica restrito às barras 1, 6 e 8. Por meio da Tabela 14, percebe-se que a barra 1 possui o maior índice de sensibilidade associado à barra 14. Assim, a metodologia VSF determina que a ação de controle deve ser executada novamente pela barra 1.

Tabela 14 – Índices de Sensibilidade na Iteração 2 da Metodologia VSF

Barra	$S[\dots, 14]^{(2)}$
1	0,168567
6	0,0744426
8	0,106081

Para realizar o redespacho na barra 1, o nó final instalado no GC realiza a transmissão, por meio da tecnologia de comunicação sem fio WiMAX, dos pacotes contendo a ação de controle a ser executada. O nó final instalado no NC conectado à barra 1 recebe os pacotes relativos à segunda iteração de controle em 96 ms. Nesse instante, o NC processa os pacotes recebidos e efetua a alteração no despacho de potência reativa da barra 1.

Para realizar a alteração na geração de potência reativa, a magnitude de tensão da barra 1 é incrementada para o valor de 1,04511 ($V_1 = 1,04511$). Após o incremento, o GC executa o Fluxo de Carga para determinar o novo ponto de operação. O novo ponto de operação resultante da execução da ação de controle na barra 1 é apresentado na Tabela 15.

Tabela 15 – Ponto de Operação do CT-1 após Iteração 2 da Metodologia VSF

Barra (k)	V_k (p.u.)	θ_k (graus)	P_{C_k} (MW)	Q_{C_k} (MVar)	P_{G_k} (MW)	Q_{G_k} (MVar)
1	1,04511	0	0	0	283,59	16,8462
2	1,0139	-6,18212	25,389	13,97	40	50
3	0,973057	-16,0412	110,214	20,9	0	40
4	0,967289	-12,6749	55,926	-4,29	0	0
5	0,972425	-10,7668	8,892	1,76	0	0
6	1,002	-18,0838	13,104	8,25	0	15,9967
7	0,98683	-16,6427	0	0	0	0
8	1,02	-16,6427	0	0	0	19,2073
9	0,966865	-18,7767	34,515	18,26	0	0
10	0,963934	-19,0456	10,53	6,38	0	0
11	0,978417	-18,7317	4,095	1,98	0	0
12	0,982407	-19,2377	7,137	1,76	0	0
13	0,97519	-19,3176	15,795	6,38	0	0

14	0,947985	-20,4136	17,433	5,5	0	0
----	-----------------	----------	--------	-----	---	---

Por meio da Tabela 15 percebe-se que a barra 14 ainda apresenta sua magnitude de tensão ($V_{14} = 0,947985$) abaixo do limite mínimo, ou seja, o sistema de transmissão ainda possui violação de tensão. Portanto, torna-se necessário executar outra ação de controle. Baseado no ponto de operação após o segundo ajuste na magnitude de tensão da barra 1, verifica-se que o conjunto das barras de controle aptas a realizarem o redespacho de potência continua restrito às barras 1, 6 e 8. Por meio da Tabela 16 é apresentado que a barra 1 possui o maior índice de sensibilidade associado à barra 14. Assim, a metodologia VSF determina que a ação de controle deve ser executada pela barra 1.

Tabela 16 – Índices de Sensibilidade na Iteração 3 da Metodologia VSF

Barra	Iteração 3
1	0,166679
6	0,0759379
8	0,107043

Para realizar o redespacho na barra 1, o nó final instalado no GC realiza a transmissão, por meio da tecnologia de comunicação sem fio WiMAX, dos pacotes contendo a ação de controle a ser executada. O nó final instalado no NC conectado à barra 1 recebe os pacotes relativos à terceira iteração de controle em 108 *ms*. Nesse instante, o NC processa os pacotes recebidos e efetua a alteração no despacho de potência reativa da barra 1.

Para realizar a alteração na geração de potência reativa, a magnitude de tensão da barra 1 é incrementada para o valor de 1,05 ($V_1 = 1,05$). Após o incremento, o GC executa o Fluxo de Carga para determinar o novo ponto de operação. Com o novo ponto de operação determinado, deve-se verificar se alguma barra de controle excedeu os limites na geração de potência reativa. O novo ponto de operação resultante da execução da ação de controle na barra 1 é apresentado na Tabela 17.

Tabela 17 – Ponto de Operação do CT-1 após Iteração 3 da Metodologia VSF

Barra (k)	V_k (p.u.)	θ_k (graus)	P_{C_k} (MW)	Q_{C_k} (MVar)	P_{G_k} (MW)	Q_{G_k} (MVar)
1	1,05	0	0	0	283,433	18,8792
2	1,01815	-6,11277	25,389	13,97	40	50
3	0,976903	-15,8872	110,214	20,9	0	40
4	0,970503	-12,5355	55,926	-4,29	0	0
5	0,975697	-10,6405	8,892	1,76	0	0
6	1,002	-17,9158	13,104	8,25	0	14,1311

7	0,988286	-16,4919	0	0	0	0
8	1,02	-16,4919	0	0	0	18,3639
9	0,968265	-18,6238	34,515	18,26	0	0
10	0,965098	-18,89	10,53	6,38	0	0
11	0,979014	-18,5708	4,095	1,98	0	0
12	0,982514	-19,0696	7,137	1,76	0	0
13	0,975399	-19,1517	15,795	6,38	0	0
14	0,948889	-20,2526	17,433	5,5	0	0

Após o terceiro ajuste a barra 14 ainda está com violação ($V_{14} = 0,948889$), conforme pode ser visto na Tabela 17. Portanto, torna-se necessário executar outra ação de controle. Baseado no ponto de operação após o terceiro ajuste na magnitude de tensão da barra, verifica-se que as barras de controle aptas a serem ajustadas são as barras 1, 6 e 8. Por meio da Tabela 16, percebe-se que a barra 1 possui o maior índice de sensibilidade associado à barra 14, no entanto, a barra 1 já atingiu o seu limite superior de magnitude de tensão ($V_1 = 1,05$) e não pode ser mais ajustada. A barra 8 possui o segundo maior valor de índice de sensibilidade, e, portanto, a metodologia VSF determina que a ação de controle deve ser executada pela barra 8.

Tabela 18 – Índices de Sensibilidade na Iteração 4 da Metodologia VSF para o CT-1

Barra	Iteração 4
1	0,166679
6	0,0766436
8	0,107497

Para realizar o redespacho na barra 8, o nó final instalado no GC realiza a transmissão, por meio da tecnologia de comunicação sem fio WiMAX, dos pacotes contendo a ação de controle a ser executada. O nó final instalado no NC conectado à barra 8 recebe os pacotes relativos à quarta iteração de controle em 535 *ms*. Nesse instante, o NC processa os pacotes recebidos e efetua a alteração no despacho de potência reativa da barra 6.

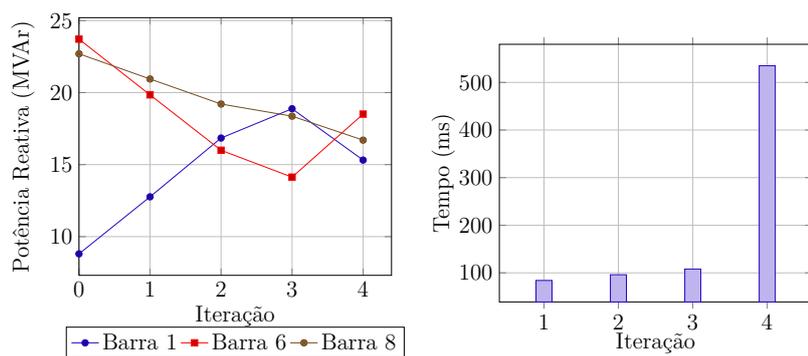
Para realizar a alteração na geração de potência reativa, a magnitude de tensão da barra 8 é incrementada para o valor de 1,03 ($V_8 = 1,03$). Após o incremento, o GC executa o Fluxo de Carga para determinar o novo ponto de operação. O novo ponto de operação resultante da execução da ação de controle na barra 8 é apresentado na Tabela 19.

Por meio da Tabela 19 percebe-se que a violação de tensão da barra 14 foi corrigida e o sistema de transmissão encontra-se com valores adequados de tensão em todas as barras.

Tabela 19 – Ponto de Operação do CT-1 após Iteração 4 da Metodologia VSF para o CT-1

Barra	V_k (p.u.)	θ_k (graus)	P_{C_k} (MW)	Q_{C_k} (MVA _r)	P_{G_k} (MW)	Q_{G_k} (MVA _r)
1	1,05	0	0	0	283,365	17,3107
2	1,01878	-6,1185	25,389	13,97	40	50
3	0,978073	-15,8804	110,214	20,9	0	40
4	0,972078	-12,5464	55,926	-4,29	0	0
5	0,976796	-10,6417	8,892	1,76	0	0
6	1,002	-17,8718	13,104	8,25	0	12,5191
7	0,99319	-16,4983	0	0	0	0
8	1,03	-16,4983	0	0	0	21,5236
9	0,971717	-18,6235	34,515	18,26	0	0
10	0,967967	-18,882	10,53	6,38	0	0
11	0,980483	-18,5469	4,095	1,98	0	0
12	0,982777	-19,0254	7,137	1,76	0	0
13	0,975914	-19,1138	15,795	6,38	0	0
14	0,951115	-20,2298	17,433	5,5	0	0

A Figura 6 ilustra o despacho de potência reativa nas barras de controle durante as quatro iterações da metodologia de controle executadas para correção da violação de tensão na barra 14. Nas iterações 1 a 3, a barra 1 foi selecionada pela metodologia VSF para injetar potência reativa. Entretanto, a violação de tensão na barra 14 não foi totalmente corrigida e por isso, foi necessária a execução de mais uma ação de controle. Na iteração 4, a barra 8 foi selecionada pela metodologia VSF para injetar potência reativa no sistema. A tensão da barra 8 foi, então, incrementada, injetando potência reativa no sistema e corrigindo a violação de tensão na barra 14.



(a) Geração de potência reativa. (b) Tempo para execução do despacho.

Figura 6 – Geração de Potência Reativa da metodologia VSF para o CT-1

3.2.1.3 Perdas de Potência Ativa para o CT-1

Finalmente, são ilustradas na Figura 7 as perdas de potência ativa à medida que são executadas cada uma das ações de controle. Até a terceira iteração as perdas para

as duas metodologias são as mesmas, pois as duas metodologias executam os mesmos ajustes. No entanto, na quarta iteração a metodologia MaxQ seleciona a barra 6 para realizar o redespacho de reativo e o sistema alcança um ponto de operação com perdas de potência iguais a 20,3361 MW. A metodologia VSF, por sua vez, escolhe a barra 8 para ser ajustada, conduzindo o sistema a um ponto de operação com perdas iguais a 20,3352 MW. Dessa forma, é possível afirmar que a utilização da estimativa de variação na geração de potência reativa, ou dos índices de sensibilidade, para selecionar a barra de controle a realizar o redespacho de reativo a cada iteração de controle, é capaz de conduzir as magnitudes de tensão violadas à faixa de operação adequada.

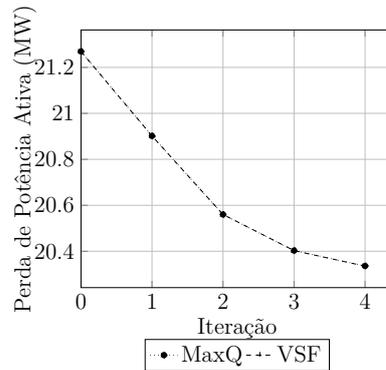


Figura 7 – Perdas de Potência Ativa por Metodologia para o CT-1

3.2.2 Cenário de Teste 2 (CT-2)

O sistema de 57 barras consiste na aproximação de um sistema elétrico do meio-oeste dos Estados Unidos no início da década de 60 (IEEE, 1993). Esse sistema é ilustrado na Figura 8, caracterizado pelo conjunto de barras de controle $G = \{1, 2, 3, 6, 8, 9, 12\}$.

Na Tabela 20 são apresentadas as grandezas $(V_k, \theta_k, P_{C_k}, Q_{C_k}, P_{G_k}, Q_{G_k})$ que caracterizam as barras que apresentam violação da magnitude de tensão. Todas as barras violaram o limite inferior da faixa adequada ($V_k^{min} = 0,95$). A Tabela 21 apresenta os limites de geração de potência reativa para o sistema de 57 Barras.

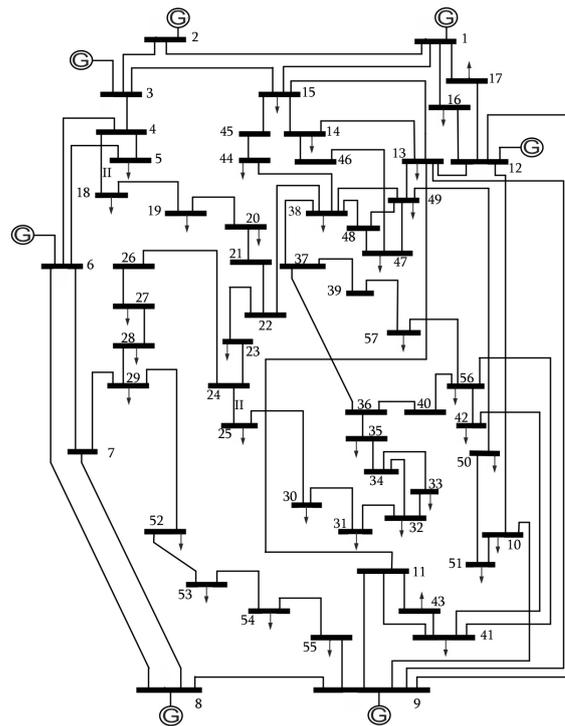


Figura 8 – Sistema de 57 barras.

Tabela 20 – Violações da magnitude de tensão no CT-2

Barra	V_k (p.u.)	θ_k (graus)	P_{C_k} (MW)	Q_{C_k} (MVar)	P_{G_k} (MW)	Q_{G_k} (MVar)
26	0,949248	-13,4439	0	0	0	0
31	0,943127	-19,6278	5,8	2,9	0	0
32	0,94643	-19,0028	1,6	0,8	0	0
33	0,944127	-19,0428	3,8	1,9	0	0
34	0,948481	-15,15	0	0	0	0

Tabela 21 – Limites de Geração de Potência Reativa para o Sistema de 57 Barras

Barra (k)	$Q_{G_k}^{min}$ (MVar)	$Q_{G_k}^{max}$ (MVar)
1	$-\infty$	∞
2	-17	50
3	-10	60
6	-8	25
8	-140	200
9	-3	9
12	-150	155

Diferentemente do foi apresentado para o CT-1, a explicação relacionada as correções executadas pelas metodologia serão simplificadas.

3.2.2.1 Correção do CT-2 pela metodologia MaxQ

A fim de demonstrar como as sequências de ajustes são determinadas pela metodologia MaxQ, a Tabela 27 apresenta a variação da injeção de potência reativa para os três ajustes de controle executadas. A metodologia seleciona a barra j que possui a maior variação da injeção de potência reativa, desde que a geração de potência reativa de j esteja dentro dos limites $Q_{G_j}^{min} \leq Q_{G_j} \leq Q_{G_j}^{max}$ e que a magnitude de tensão na barra j seja inferior ao limite superior ($V_{G_j} < 1,05$), pois é necessário injetar potência reativa da rede. Dessa forma, o conjunto G ficou restrito, inicialmente, às barras 1, 3, 8 e 12 $G = \{1, 3, 8, 12\}$. Os dois últimos ajustes são executados na barra 8 porque a magnitude de tensão da barra 1 ser 1,05 ($V_1 = 1,05$).

Tabela 22 – Variação de Injeção de Potência Reativa pela Metodologia MaxQ para o CT-2

Iteração	Barra 1	Barra 3	Barra 8	Barra 12
1	0,647904	-0,21482	0,000124043	-0,0158325
2	0,647904	-0,161393	0,0022073	-0,011602
3	0,647904	-0,00370753	0,000136666	-0,000315717

A evolução das magnitudes de tensão nas barras de controle a cada iteração é apresentada na Tabela 22.

Os tempos necessários para que o nó final instalado nos NCs das barras selecionadas pela metodologia MaxQ recebam os pacotes enviados pela tecnologia sem fio WiMAX com os ajustes de controle enviado pelo nó final conectado ao GC são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 – Evolução das Magnitudes de Tensão nas Barras de Controle Determinadas pela Metodologia MaxQ para o CT-2

Iteração	Barra 1	Barra 3	Barra 8	Barra 12
1	1,05	1,0	1,005	1,015
2	1,05	1,0	1,015	1,015
3	1,05	1,0	1,025	1,015

Na Tabela 25 são apresentados as grandezas ($V_k, \theta_k, P_{C_k}, Q_{C_k}, P_{G_k}, Q_{G_k}$) das barras que tiveram sua violação de tensão corrigida com a execução dos ajustes de controle.

Na Figura 9 são exibidas as gerações de potência reativa após cada um dos ajustes de controle determinados pela metodologia MaxQ. Percebe-se que a barra 12 foi responsável

Tabela 24 – Tempo em *ms* para Execução dos Ajustes de Controle Determinados pela Metodologia MaxQ para o CT-2

Iteração	Barra 1	Barra 3	Barra 8	Barra 12
1	44	-	-	-
2	-	-	561	-
2	-	-	573	-

Tabela 25 – Estado das Barras de Carga Após a Execução dos Ajustes pela Metodologia MaxQ para o CT-2

Barra	V_k (p.u.)	θ_k (graus)	P_{C_k} (MW)	Q_{C_k} (MVA _r)	P_{G_k} (MW)	Q_{G_k} (MVA _r)
26	0,959824	-13,2599	0	0	0	0
31	0,953656	-19,3118	5,8	2,9	0	0
32	0,955931	-18,6751	1,6	0,8	0	0
33	0,953652	-18,7143	3,8	1,9	0	0
34	0,95636	-14,905	0	0	0	0

por injetar a maior quantidade de reativos no sistema para corrigir as violações das magnitudes de tensão.

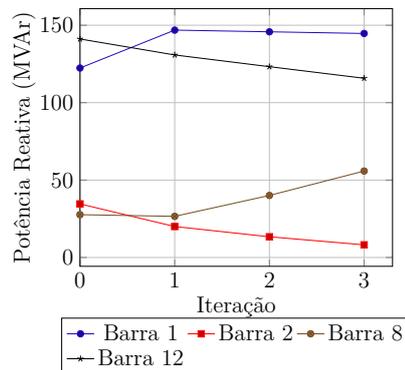


Figura 9 – Geração de Potência Reativa da metodologia MaxQ para o CT-2.

3.2.2.2 Correção do CT-2 pela metodologia VSF

A Tabela 26 apresenta a sequência de ajustes determinada pela metodologia VSF, executados nas barras de controle do sistema para realizar o redespacho de potência reativa necessário para corrigir as violações nas magnitude de tensão, a partir dos índices de sensibilidade. A metodologia VSF demandou duas ações de controle. A metodologia VSF seleciona as barras de controle j que tenham a geração de potência reativa dentro dos limites $Q_{G_j}^{min} \leq Q_{G_j} \leq Q_{G_j}^{max}$ e que possuam a magnitude de tensão inferior ao limite $V_{G_j} < 1,05$. O conjunto das barras de controle aptas a operar no sistema ficam restrito às barras 1, 3, 8 e 12 ($G = \{1, 3, 6, 8\}$).

A evolução das magnitudes de tensão nas barras de controle a cada iteração é apresentada na Tabela 27.

Os tempos necessários para que o nó final instalado nos NCs das barras, selecionadas pela metodologia VSF, recebam os pacotes enviados pela tecnologia sem fio WiMAX, com os ajustes de controle enviado pelo nó final conectado ao GC são apresentados na Tabela 28.

Tabela 26 – Índices de Sensibilidade da Metodologia VSF para o CT-2

Iteração	Barra 1	Barra 3	Barra 8	Barra 12
1	0,0401031	0,0526358	0,101924	0,058709
2	0,0394989	0,051757	0,0996724	0,057819

Tabela 27 – Evolução das Magnitudes de Tensão nas Barras de Controle Determinadas pela Metodologia VSF para o CT-2

Iteração	Barra 1	Barra 3	Barra 8	Barra 12
1	1,04	1,0	1,015	1,015
2	1,04	1,0	1,025	1,015

Tabela 28 – Tempo em *ms* para Execução dos Ajustes de Controle Determinados pela Metodologia VSF para o CT-2

Iteração	Barra 1	Barra 3	Barra 8	Barra 12
1	-	-	549	-
2	-	-	561	359

Na Tabela 29 são apresentados as grandezas ($V_k, \theta_k, P_{C_k}, Q_{C_k}, P_{G_k}, Q_{G_k}$) das barras que tiveram sua violação de tensão corrigida com a execução dos ajustes de controle.

Tabela 29 – Estado das Barras de Carga Após a Execução dos Ajustes pela Metodologia VSF para o CT-2

Barra	V_k (p.u.)	θ_k (graus)	P_{C_k} (MW)	Q_{C_k} (MVAr)	P_{G_k} (MW)	Q_{G_k} (MVAr)
26	0,958668	-13,5009	0	0	0	0
31	0,951952	-19,5705	5,8	2,9	0	0
32	0,954136	-18,9294	1,6	0,8	0	0
33	0,951853	-18,9688	3,8	1,9	0	0
34	0,954563	-15,1467	0	0	0	0

Na Figura 10 são exibidas as gerações de potência reativa após cada um dos ajustes de controle determinados pela VSF. Percebe-se que a barra 8 ficou responsável por realizar o redespacho de potência reativa necessário para corrigir as violações de tensão.

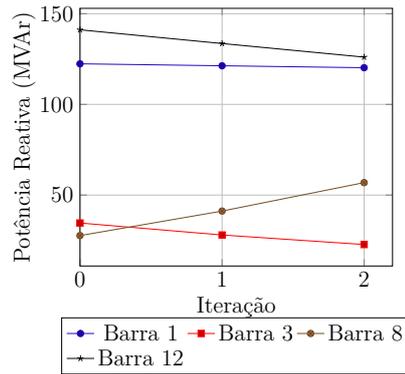


Figura 10 – Geração de Potência Reativa para a VSF para o CT-2

3.2.2.3 Perdas de Potência Ativa CT-2

Finalmente, são apresentadas as perdas de potência ativa para cada uma das metodologias na Figura 11. Por intermédio da análise do gráfico de perdas, é possível perceber que a metodologia VSF corrige as violações com um menor número de iterações, mas com perdas de potência ativa superiores às resultantes dos ajustes realizados pela metodologia MaxQ. Dessa forma, a metodologia MaxQ conseguiu realizar uma sequência de ajustes que reduziu o desperdício de potência ativa.

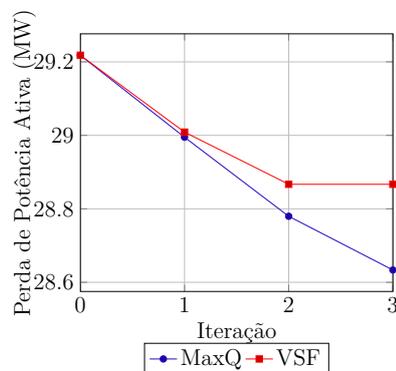


Figura 11 – Perdas de Potência Ativa por Metodologia para o CT-2.

3.3 Análise da Rede de Dados

Com o objetivo de avaliar o funcionamento da infraestrutura de comunicação aplicada à abordagem, foram aplicadas as tecnologias WiMAX e DWDM para interconectar o sistema e transmitir as ações de controle a serem executadas. A análise aplicada está dividida em duas partes e são realizadas com base nos arquivos de log gerados pelo NS-3. A primeira é a Análise de Atraso e Volume de Dados (AVD), empregada para determinar o tempo necessário para transmitir dados entre os nós instalados no sistema de transmissão e a quantidade de dados efetivamente transmitidos, com o intuito de avaliar a eficiência da infraestrutura de comunicação. A última, é a Análise de Disponibilidade Média da Rede,

aplicada na determinação da capacidade das tecnologias de comunicação utilizadas em fornecer o serviço de conexão aos dispositivos do sistema.

A modelagem do sistema de 14 barras, na ferramenta NS-3, é apresentada nos Apêndices A e B para as redes WiMAX e DWDM, respectivamente. Enquanto, a modelagem do sistema de 57 barras é apresentada nos Apêndices C e D.

3.3.1 Parametrização da Rede de Dados

A parametrização empregada na rede WiMAX é descrita na Tabela 30, que apresenta os principais valores aplicados às camadas MAC e física. O canal de transmissão, refere-se a faixa de frequência utilizável para comunicação, que corresponde a banda de 5 GHz. A largura de banda (capacidade de transmissão do meio) do canal WiMAX é igual à 10 MHz. A modulação e demodulação são realizadas por meio de processamento numérico e utiliza 256 pontos da FFT para criar subcanais que compartilham uma única faixa de frequência para transmissão dos pacotes. O número de subcanais para transmissão de dados é igual a 192 e a taxa de prefixo cíclico utilizado para evitar interferência entre símbolos é 1/4. A duração de cada *frame* é 10 ms e do slot físico é 10 μ s. A potência de transmissão aplicada às SSs corresponde a 30 dBm. O esquema de modulação aplicado para transmissão é 16 QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*), com uma taxa de codificação por símbolo igual a 1/2 e uma taxa de dados igual a 27,65 Mbps. O modelo de propagação aplicado é COST 231 (BRITO, 1993), também chamado de *Hata Model PCS Extension*, que é uma extensão do Hata Model para cobrir uma faixa mais elaborada de frequências.

Tabela 30 – Parâmetros aplicados ao WiMAX.

Parâmetros	Valor
Canal de transmissão	5 GHz
Largura de Banda	10 MHz
<i>Carriers</i> N_{FFT}	256
<i>Carriers</i> de Dados	192
Prefixo Cíclico	1/4
Duração do <i>frame</i>	10 ms
Duração do <i>slot</i> físico	10 μ s
TxPower	30 dBm
<i>Frame Ratio</i>	1:1
Modulação	16 QAM
Taxa de codificação	1/2
Taxa de Dados	27,65 Mbps
Modelo de perda de propagação	COST 231

DWDM é uma tecnologia que permite dividir a largura de banda completa, disponibilizada por uma rede óptica, em um número de pequenos canais. Comporta-se como um mecanismo de multiplexação semelhante a divisão por frequência aplicada nas redes tradicionais, tendo sua denominação derivada da utilização do termo comprimento de onda (λ) ao invés de frequência. DWDM Possui como principais vantagens a transmissão de múltiplos fluxos de dados simultaneamente e permite que feixes ópticos com diferentes comprimentos de onda propaguem-se sem interferência e com variadas taxas de transmissão (MILETIC, 2015).

A parametrização empregada na rede DWDM é descrita na Tabela 31. O atraso de propagação de um enlace totalmente óptico entre dois nós (*lightpath*) é 10 ms. O número de interfaces para recepção de sinal óptico (Rx) por OXC (*Optical Cross-Connect*) é 1048, o mesmo para a quantidade de interfaces de transmissão (Tx). O número de interfaces por multiplexador (ou demultiplexador) é 64, responsáveis por combinar e separar os canais de λ , respectivamente.

Tabela 31 – Parâmetros aplicados à rede DWDM (MILETIC, 2015).

Parâmetros	Valor
Atraso de Propagação	10 ms
Rx por OXC	1048
Tx por OXC	1048
Rx por Multiplexador	64
Tx por Demultiplexador	64

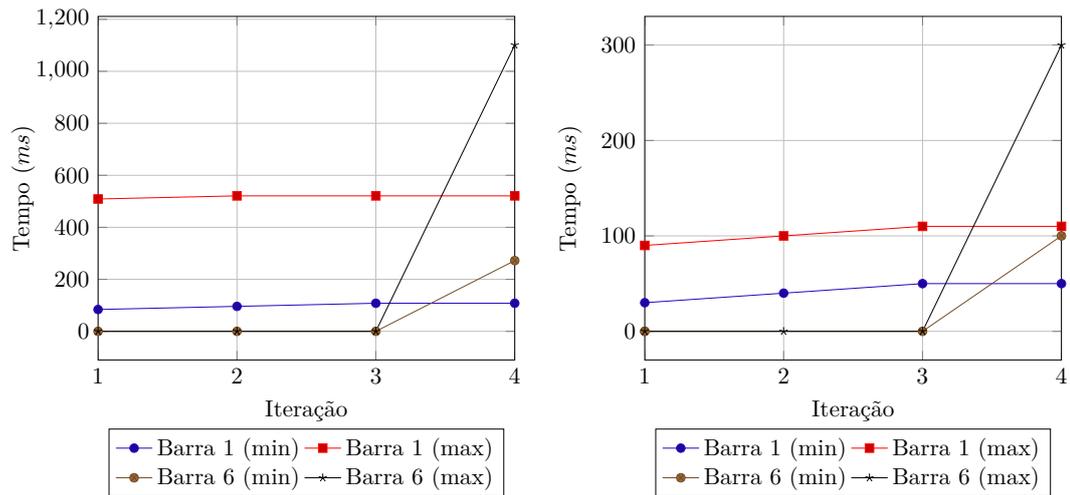
3.3.2 Atraso e Volume de Dados (AVD)

A análise AVD do CT-1 e do CT-2 verifica os tempos máximo e mínimo que um pacote demora para ser transmitido pelo nó final conectado ao GC, até o nó final instalado no NC fixado na barra de controle escolhida para realizar o redespacho de reativo. São analisados os tempos máximo e mínimo, em virtude dos pacotes seguirem diferentes caminhos na topologia de conexões existentes na rede de dados. Portanto, um mesmo pacote com um ajuste de controle pode ser entregue mais de uma vez ao destinatário final. No entanto, um ajuste de controle é executado apenas para o primeiro pacote entregue. Adicionalmente, no intuito de avaliar o desempenho das tecnologias de comunicação, é apresentado a quantidade de pacotes que são entregues a um NC por iteração de controle.

3.3.2.1 Análise do CT-1 para a metodologia MaxQ

A correção do CT-1 realizada pela metodologia MaxQ realiza duas iterações de controle e os atrasos são ilustrados nas Figuras 12a e 12b, para as redes WiMAX e DWDM, respectivamente. As Figuras 12a e 12b ilustram os atrasos mínimo e máximo (referidos como

min e max, respectivamente) para a entrega dos pacotes. É possível perceber que o tempo mínimo para a rede WiMAX encaminhar o primeiro comando de controle determinado pela metodologia MaxQ é 84 ms e o tempo mínimo para o quarto ajuste de controle é 272 ms . Com relação ao tempo mínimo para a rede DWDM, o primeiro ajuste de controle é entregue ao nó final no NC conectado à barra 6 com 30 ms e o segundo comando de controle é entregue ao nó final conectado à barra 1 com 100 ms .



(a) Atraso para execução dos ajustes de controle na rede WiMAX (b) Atraso para execução dos ajustes de controle na rede DWDM

Figura 12 – Atraso para a execução dos ajustes de controle da metodologia MaxQ no CT-1

Os volumes de dados entregues são ilustrados nas Figuras 13a e 13b para as tecnologias de comunicação WiMAX e DWDM, respectivamente. É possível perceber que ambas as tecnologias conseguem entregar os comandos de regulação associado a cada um das iterações de controle. O nó final conectado ao NC da barra 1, que é responsável por alterar o despacho de potência reativa nas três primeiras iteração de controle, possui dois enlaces para troca de dados e recebe cinco pacotes (5120 Bytes) relacionados ao primeiro comando de controle. Por sua vez, o nó final conectado ao NC da barra 6, que realiza o redespacho de reativo na quarta iteração de controle, possui quatro enlaces de comunicação e recebe dois pacotes (2048 Bytes).

3.3.2.2 Análise do CT-1 para a metodologia VSF

A correção do CT-1 realizada pela metodologia VSF realiza quatro iterações de controle e os atrasos são ilustrados nas Figuras 14a e 14b, para as redes WiMAX e DWDM, respectivamente. As Figuras 14a e 14b ilustram os atrasos mínimo e máximo para a entrega dos pacotes. O tempo mínimo para a tecnologia WiMAX encaminhar o primeiro e o quarto comando de controle determinado pela metodologia VSF são 85 ms e 535 ms respectivamente. Com relação ao tempo mínimo para a rede DWDM, os tempos para entrega do primeiro e do quarto ajuste de controle são 30 ms e 130 ms . Os tempos máximos e

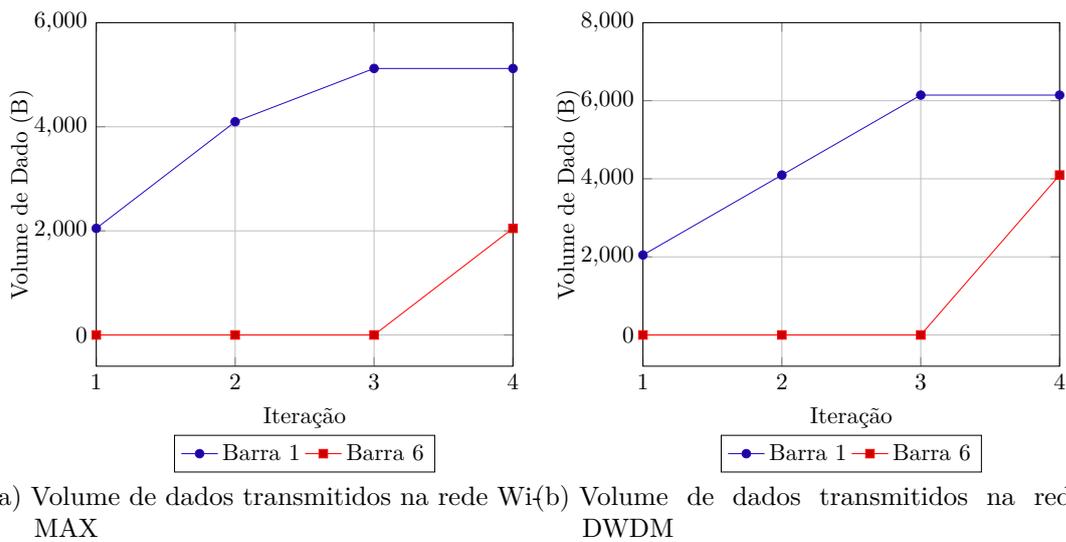


Figura 13 – Volume de dados para a execução dos ajustes de controle da metodologia MaxQ no CT-1

mínimo para entrega do pacote ao nó final da barra 8 são os mesmos, em virtude da barra 8 só possuir um enlace de comunicação.

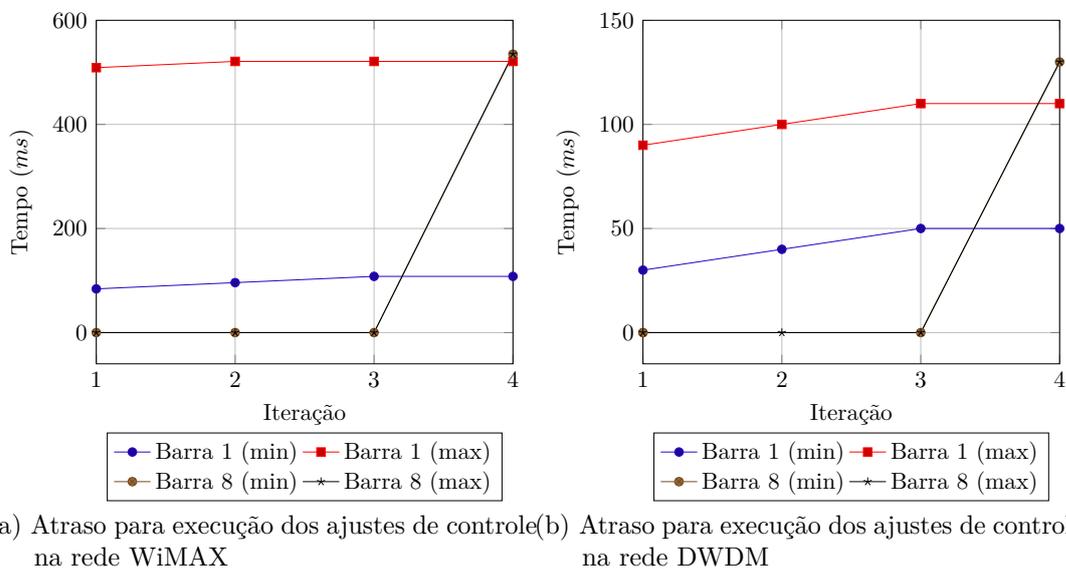
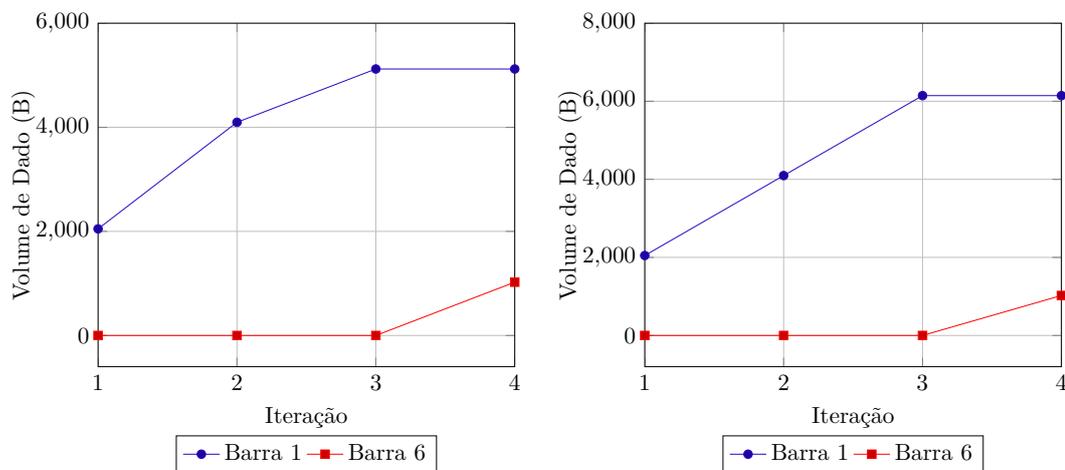


Figura 14 – Atraso para a execução dos ajustes de controle da metodologia VSF no CT-1

Os volumes de dados entregues são ilustrados nas Figuras 15a e 15b para as tecnologias de comunicação WiMAX e DWDM, respectivamente. Ambas as tecnologias entregam cada um dos ajustes de controle. No entanto, a tecnologia WiMAX consegue transmitir no total cinco pacotes (5120 Bytes) ao nó final conectado ao NC da barra 1, que altera o despacho de potência reativa nas três primeiras iterações de controle e um pacote (1024 Bytes) ao nó final conectado ao NC da barra 8, que realiza o redespacho de potência reativa na quarta iteração. Por sua vez, a tecnologia DWDM entrega seis pacotes

(6144 Bytes) ao nó final da barra 1 e um pacote (1024 Bytes) ao nó final da barra 8.



(a) Volume de dados transmitidos para execução dos ajustes de controle na rede WiMAX (b) Volume de dados transmitidos para execução dos ajustes de controle na rede DWDM

Figura 15 – Volume de dados para execução dos ajustes de controle da metodologia VSF no CT-1

3.3.2.3 Análise do CT-2 para a metodologia MaxQ

As informações relacionadas ao atraso máximo e mínimo, para a execução dos ajustes de controle determinados pela MaxQ, são apresentadas nas Tabelas 32¹ e 33 para as redes DWDM e WiMAX, respectivamente. Com relação ao atrasos, a rede WiMAX manteve uma latência superior ao da rede DWDM. Tendo em vista, que o sistema de 57 barras possui muitos mais enlaces que o sistema de 14 barras, bem como a rede WiMAX apresenta um número de nós de comutação bem superior à rede DWDM. Portanto, um nó final de um determinado NC espera muito mais tempo para receber um ajuste de controle enviado pela rede WiMAX.

Tabela 32 – Tempos mínimo e máximo (em *ms*) para execução da MaxQ na rede WiMAX.

Iteração	Barra 1	Barra 3	Barra 8	Barra 12
1	44 / 752	-	-	-
2	-	-	561 / 581	-
3	-	-	573 / 594	-

Tabela 33 – Tempos mínimo e máximo (em *ms*) para execução da MaxQ na rede DWDM.

Iteração	Barra 1	Barra 3	Barra 8	Barra 12
1	30 / 200	-	-	-

¹ Formato de apresentação das informações: *atraso_mínimo / atraso_máximo*

2	-	-	150 / 170	-
3	-	-	160 / 180	-

Com relação ao volume de dados trafegados, exibido nas Figuras 16a e 16b, a rede WiMAX transmite a mesma quantidade de dados que a rede DWDM. São transmitidos quatro pacotes (4096 *Bytes*) para o nó final conectado ao NC da barra 1 e seis pacotes (6144 *Bytes*) para a barra 6. As informações da análise AVD relacionada à metodologia VSF (apresentada no Apêndice H), exibem resultados semelhantes à análise da metodologia MaxQ.

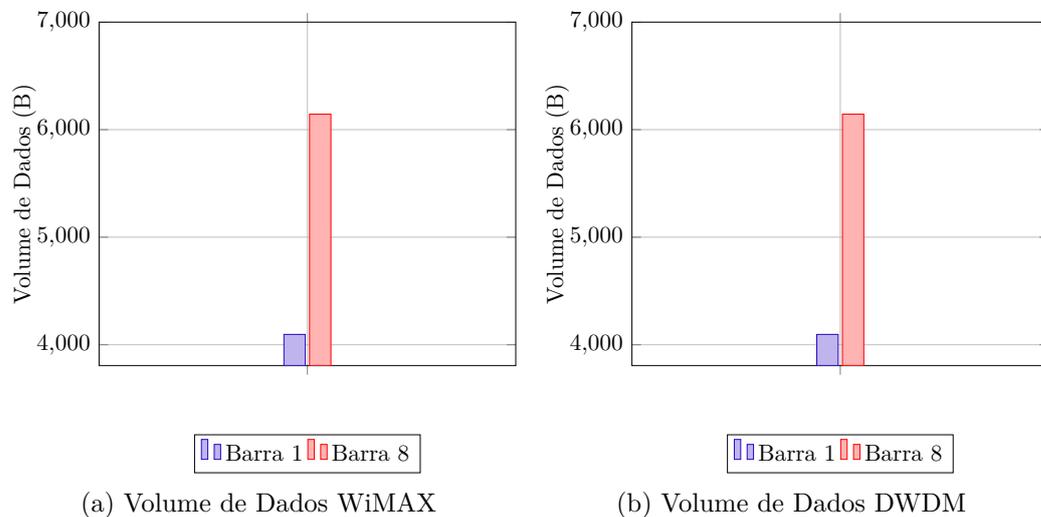


Figura 16 – Volume de Dados de controle para a MaxQ.

3.3.3 Análise de Disponibilidade Média

Nesta seção são apresentados os resultados sobre a disponibilidade obtida com base na formulação apresentada na Seção 1.3.2. Para a realização dos experimentos e obtenção dos dados da disponibilidade são aplicadas as tecnologias WiMAX e DWDM. A rede DWDM é definida com suporte a 1 Gbps e transmissão bidirecional por comprimento de onda. Os resultados apresentados avaliam as redes sem qualquer interação entre elas.

As topologias consideradas são baseadas nas conexões existentes no sistemas IEEE 14 e 57 barras. Os Tráfegos utilizados para determinar a máxima taxa de dados a ser transmitido são associados à transmissão dos ajustes de controle definidos pela abordagem proposta neste trabalho e a uma aplicação de controle de subestação apresentada em Lévesque e Maier (2014) (as aplicações são descritas na Tabela 34). O objetivo da análise é determinar se os requisitos de disponibilidade, exigidos por diferentes aplicações em execução no sistema de transmissão de energia elétrica, são garantidos.

Tabela 34 – Descrição das aplicações empregadas para análise de disponibilidade.

Aplicação	Tamanho de pacote	Taxa por segundo	Prioridade
Abordagem de Controle (AC)	1024	$\frac{1}{10}$	0,5
Subestação (Sb)	5000	$\frac{1}{30}$	0,5

3.3.3.1 Análise WiMAX

Para avaliação da tecnologia de transmissão de dados sem fio WiMAX foram definidos diferentes quantidades de fluxos das duas aplicações descritas na Tabela 34 em execução. As quantidades de tráfego aplicadas são definidas na Tabela 35. São utilizados diferentes valores de probabilidade de bloqueio e taxas de tráfego associadas às portas de saída das interfaces WiMAX, com o intuito de avaliar a priorização do tráfego de dados relacionado a execução das sequência de ajustes para corrigir as violações da magnitude de tensão.

Tabela 35 – Descrição das fluxos.

Tipo	Número de fluxos da aplicação AC	Número de fluxos da aplicação Sb
Tráfego A	50	100
Tráfego B	50	200
Tráfego C	50	300
Tráfego D	50	400

Para análise ilustrada nas Figuras 17a, 17b, 17c e 17d percebe-se que foram testadas diferente rotas para entrega dos ajustes de controle aos nós finais, instalados no NCs conetados às barras de geração de potência reativa. Além disso, é considerado que a probabilidade de falha de uma estação base pode assumir os valores 10^{-5} , 10^{-4} , 10^{-3} , 10^{-2} , 10^{-1} e 1.

Os diferentes caminhos para entrega dos ajustes de controle são avaliados no intuito de se obter um valor descrevendo a capacidade de cada rota em transmitir efetivamente os pacotes. Cada caminho possui uma quantidade diferente de saltos e a disponibilidade por um único salto (definida na Equação 1.21) é utilizada para calcular a disponibilidade de uma rota. Para todos os experimentos o atraso médio de transmissão para um salto é considerado 30 *ms*.

As Figuras 17a, 17b, 17c e 17d ilustram a rede WiMAX em diferentes tráfegos. Para o caminho com 4 saltos que apresenta uma intensidade de tráfego igual a 2,2 ($\rho = 2,2$) e probabilidade de bloqueio igual a 0,545455 ($B(\rho) = 0,545455$), sendo apresentando apenas o Tráfego D, em virtude da disponibilidade ter um valor muito próximo de 1 para quase

todas as probabilidades de falhas. Para a rota com 12 saltos também é avaliado o Tráfego D, que possui intensidade de tráfego igual a 6,6 ($\rho = 6,6$) e probabilidade de bloqueio igual 0,848485 ($B(\rho) = 0,848485$). Para a rota de 41 saltos são exibidos os Tráfegos B (com $(\rho = 14,35)$ e $(B(\rho) = 0,930314)$), C (com $(\rho = 18,45)$ e $(B(\rho) = 0,945799)$) e D (com $(\rho = 22,55)$ e $(B(\rho) = 0,955654)$). Por fim, a rota com 76 saltos tem a análise de disponibilidade apresentada para os Tráfegos A (com $(\rho = 19)$ e $(B(\rho) = 0,947368)$), B (com $(\rho = 26,6)$ e $(B(\rho) = 0,962406)$), C (com $(\rho = 34,2)$ e $(B(\rho) = 0,97076)$) e D (com $(\rho = 41,8)$ e $(B(\rho) = 0,976077)$).

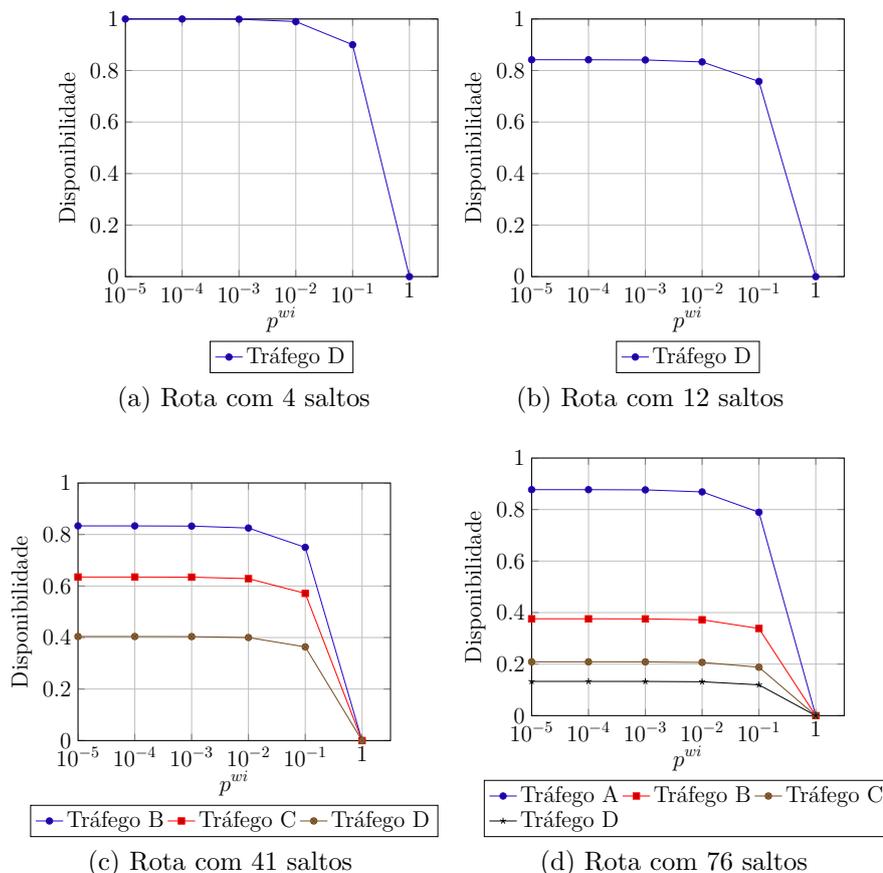


Figura 17 – Disponibilidade WiMAX para execução dos cenários de teste.

3.3.3.2 Análise DWDM

A análise de disponibilidade da tecnologia DWDM foi realizada utilizando diferentes rotas para entrega dos ajustes de controle aos nós finais, instalados nos NCs conectados às barras de geração de potência reativa. Além disso, é considerado que a probabilidade de falha (quebra) da fibra óptica pode assumir os valores 10^{-5} , 10^{-4} , 10^{-3} , 10^{-2} , 10^{-1} e 1 e para todos os experimentos o atraso médio de transmissão é considerado 10 ms.

As Figuras 17a, 17b, 17c e 17d ilustram a rede DWDM em diferentes tráfegos. Para o caminho com 4 saltos a disponibilidade é praticamente 1 para todos os tráfegos. A rota

com 12 saltos apresenta uma intensidade de tráfego igual a 2,2 ($\rho = 2,2$) e probabilidade de bloqueio igual a 0,54545 ($B(\rho) = 0,545455$) para o Tráfego D, enquanto para os outros Tráfegos a rota sempre possui um valor muito próximo de 1. Para a rota de 41 saltos é exibido a disponibilidade para o Tráfego D (com ($\rho = 77,52$) e ($B(\rho) = 0,866962$)). Por fim, a rota com 76 saltos tem a análise de disponibilidade apresentada para os Tráfegos C (com ($\rho = 11,4$) e ($B(\rho) = 0,912281$)) e D (com ($\rho = 13,93$) e ($B(\rho) = 0,92823$)).

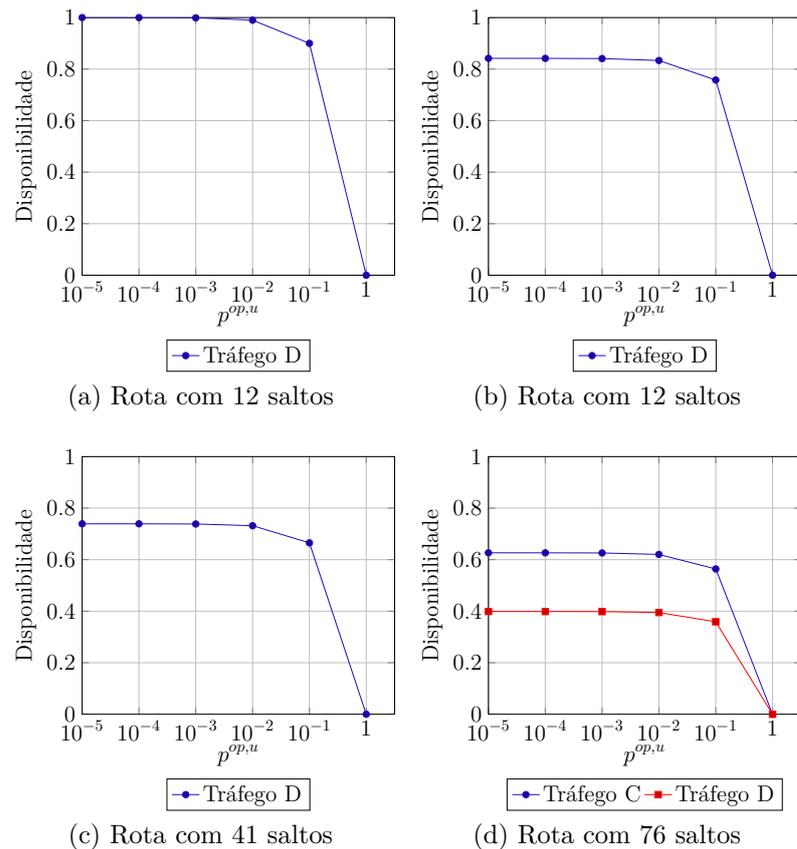


Figura 18 – Disponibilidade DWDM para execução dos cenários de teste

3.4 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados os resultados relacionados à aplicação da abordagem para a determinação da sequência de ajustes no controle da magnitude de tensão para correção das violações de tensão em sistemas de transmissão de energia elétrica. Os resultados demonstram como a abordagem ajusta o redespacho de potência reativa necessário para a correção das violações de tensão, como as magnitudes de tensão das barras de controle são alteradas e o efeito da execução dos ajustes de controle nas perdas de potência ativa no sistema. Adicionalmente, os resultados descrevem o atraso e o volume de dados associados à transmissão dos ajustes de controle e o grau de disponibilidade das tecnologias de comunicação aplicadas para conectar os dispositivos do sistema.

4 Conclusões e Trabalhos Futuros

O objetivo deste trabalho consiste em definir uma sequência de ajustes para corrigir as violações nas magnitudes de tensão das barras de carga de um sistema de transmissão de energia elétrica. Então, determina-se o conjunto de barras de controle a serem operadas e o quanto variar na injeção de potência reativa de cada uma delas. Todos os ajustes de controle definidos são encaminhados até o equipamento conectado à barra a atuar no sistema pela infraestrutura de comunicação.

A eficácia da abordagem proposta, no que se refere a análise elétrica, é avaliada de acordo com o redespacho de potência reativa realizado para eliminar as violações de tensão; os ajustes nas magnitudes de tensão nas barras de controle e as perdas de potência ativa no sistema à medida que os ajustes são realizados. Para a correção das violações de magnitude de tensão, inicialmente, o GC executa o Fluxo de Carga e determina o estado da rede elétrica e as magnitudes de tensão violadas. Em seguida, o CG aplica uma das duas metodologias de controle (MaxQ ou VSF) para definir as barras de controle a serem operadas e a sequência de ajustes a serem realizados. Ambas metodologias definem que uma barra de controle deve ser operada a cada passo de ajuste. Após a escolha da barra a ser ajustada, o GC encaminha por meio da IC o comando de controle encapsulado em um pacote de dados. O nó final instalado no NC conectado à barra de controle a ser operada, ao receber o pacote, processa o comando de controle e altera magnitude de tensão gerador síncrono, variando a injeção de potência reativa no sistema por esse gerador.

A metodologia MaxQ seleciona a barra j que possui a maior variação de injeção de potência reativa, enquanto a VSF escolhe a barra j com o maior índice de sensibilidade para ser ajustada. Após a escolha das barras a serem ajustadas, a abordagem realizou o redespacho de potência reativa, corrigindo os cenários de teste com violações de tensão. As metodologias definem diferentes sequências de ajustes e alcançam distintos pontos de operação finais, com diferentes perdas de potência ativa. No entanto, fica evidente que ambas as metodologias conseguem realizar o redespacho de potência reativa necessário.

No âmbito da infraestrutura de comunicação, a análise é baseada no tempo necessário para encaminhar os ajustes de controle definidos pelo GC, que devem ser executados pelos NCs, no volume de dados trafegado e na disponibilidade média da rede. Para realização dos experimentos e construção da topologia dos sistemas-teste utilizados, a ferramenta NS-3 é aplicada. Assim, é possível modelar de maneira mais realista os equipamentos de comunicação das tecnologias WiMAX e DWDM empregadas para conectar os dispositivos do sistema e obter as métricas de avaliação. Com base nos resultados obtidos percebe-se que uma solução para comunicação de dados sem fio aplicada a um sistema de transmissão

de energia elétrica deve utilizar um grande número de repetidores para garantir a troca de informação a distâncias com centenas de quilômetros, bem como sua taxa de transmissão não é tão efetiva quanto de uma tecnologia como DWDM. Entretanto, um infraestrutura de comunicação baseada na tecnologia WiMAX mostrou-se capaz de atender às necessidades mínimas das aplicações de um sistema de potência.

Baseado nos resultados obtidos por meio da execução dos ajustes no redespacho de potência reativa para controlar as magnitudes de tensão violadas nos cenários teste simulados, é possível justificar as contribuições da abordagem apresentada pelos seguintes itens:

- determinação de uma sequência de ajustes que, ao serem executados nos dispositivos de controle do sistema elétrico, corrigem as violações nas magnitudes de tensão;
- metodologias de controle baseadas na máxima variação da injeção de potência reativa ou nos índices de sensibilidades (ambos calculados pela matriz J_{QV}), estabelecendo os ajustes nas magnitudes de tensão a serem executados nas barras de controle para alterar o redespacho de potência reativa do sistema;
- infraestrutura de comunicação para a execução dos ajustes de controle na magnitude de tensão definidos pelo GC, possibilitando a operação dos NCs e garantindo a correção das magnitudes de tensão violadas;
- infraestrutura de comunicação modelada e executada na ferramenta de simulação computacional NS-3 com o intuito de representar adequadamente os dispositivos de comunicação e obter métricas relativas ao tráfego de dados (atraso e volume), bem como realizar a análise de disponibilidade.

4.1 Limitações

Durante o desenvolvimento, execução e análise deste trabalho, vários fatores foram considerados possíveis limitações para a abordagem proposta. As limitações mais pertinentes são as seguintes:

- o GC é instalado em um centro de operações e precisa obter dados referentes a barras situadas a longas distâncias para determinar o estado da rede, como também transmitir os ajustes de controle – essa situação pode impactar diretamente na qualidade da operação de controle executada, pois a troca de dados entre os dispositivos pode se tornar um gargalo e prejudicar a implementação da abordagem proposta;

- outras alternativas ao controle da magnitude de tensão, como a determinação de chaveamentos em bancos de capacitores e reatores e/ou comutação de taps de transformadores em fase, não foram testadas;
- a avaliação e análise comparativa da infraestrutura de comunicação considerando outras tecnologias para comunicação de dados, ou mesmo utilizando alguma abordagem híbrida, combinando as tecnologias WiMAX e DWDM, não foi realizada;
- os testes foram realizados em ambiente simulado.

4.2 Trabalhos Futuros

Baseando-se nas limitações encontradas e em ideias para complementação deste estudo, os seguintes itens são considerados pontos primordiais na continuidade da pesquisa:

- incorporação de outras formas de controle da magnitude de tensão, como a determinação de chaveamentos em bancos de capacitores e reatores e/ou comutação de taps de transformadores em fase, com o objetivo de aprimorar o funcionamento da abordagem proposta;
- aplicar a infraestrutura de comunicação de dados a outras aplicações em sistemas elétricos de potência a fim de incrementar a quantidade de dados transmitidos e introduzir concorrência pelo uso dos recursos da rede de dados;
- testar a aplicação de uma rede WiMAX com topologia Mesh ou propor uma rede híbrida WiMAX e PON, com o intuito de propor uma infraestrutura de comunicação cada vez mais adequada aos requisitos das aplicações a serem executadas;
- realizar testes em ambiente reais.

Referências

- BARI, A. et al. Challenges in the smart grid applications: an overview. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, Hindawi Publishing Corporation, v. 2014, p. 1–12, 2014. Citado na página 1.
- BRITO, G. S. D. Overview of the activities of the project cost 231 “evolution of land mobile radio (including personal) communications”. In: IEEE. *International Conference on Universal Personal Communications*. [S.l.], 1993. v. 2, p. 560–564. Citado na página 51.
- CALDERARO, V. et al. Voltage support control of unbalanced distribution systems by reactive power regulation. In: IEEE. *2014 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*. [S.l.], 2014. p. 1–5. Citado na página 10.
- CALDERARO, V. et al. A smart strategy for voltage control ancillary service in distribution networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 30, n. 1, p. 494–502, 2015. Citado 4 vezes nas páginas 15, 4, 10 e 24.
- CAPITANESCU, F.; BILIBIN, I.; RAMOS, E. R. A comprehensive centralized approach for voltage constraints management in active distribution grid. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 29, n. 2, p. 933–942, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 19.
- CHEN, S. et al. Optimal reactive power and voltage control in distribution networks with distributed generators by fuzzy adaptive hybrid particle swarm optimisation method. *IET Generation, Transmission & Distribution*, IET, 2015. Citado na página 19.
- COSTA, A. F. M. *Voltage stability indices in a system electric power*. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012. Citado na página 10.
- EREMIA, M.; SHAHIDEHPOUR, M. *Handbook of electrical power system dynamics: modeling, stability, and control*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 10.
- FANG, X. et al. Smart grid—the new and improved power grid: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, v. 14, n. 4, p. 944–980, 2012. Citado na página 11.
- FENG, B. et al. Research on framework of the next generation power communication transmission network. In: IEEE. *2012 International Conference on Computer Science and Electronics Engineering (ICCSEE)*. [S.l.], 2012. v. 3, p. 414–417. Citado na página 20.
- FONTES, R. R. et al. Simulation of openflow scenarios based on nsdl and ns-3. In: *Proceedings of the 2014 Summer Simulation Multiconference*. [S.l.]: Society for Computer Simulation International, 2014. p. 33. Citado na página 31.
- GUNGOR, V. C.; LAMBERT, F. C. A survey on communication networks for electric system automation. *Computer Networks*, Elsevier, v. 50, n. 7, p. 877–897, 2006. Citado na página 1.

- HAASZ, J. *IEEE Technical Approval letter P802.16i*. 2005. Disponível em: <<http://standards.ieee.org/board/nes/projects/802-16i.eps>>. Citado na página 12.
- HENDERSON, T. R. et al. Network simulations with the ns-3 simulator. *SIGCOMM demonstration*, v. 15, p. 17, 2008. Citado na página 31.
- IBRAHIM, M.; SALAMA, M. M. Smart distribution system volt/var control using distributed intelligence and wireless communication. *IET Generation, Transmission & Distribution*, IET, v. 9, n. 4, p. 307–318, 2015. Citado na página 20.
- IEEE. *57 Bus Power Flow Test Case*. 1993. Disponível em: <https://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf57/pg_tca57bus.htm>. Citado na página 45.
- IEEE. *IEEE 802 Executive Committee Study Group on Broadband Wireless Access (802.N-WEST)*. 1998. Disponível em: <<http://www.ieee802.org/16/studygroup/>>. Citado na página 12.
- IEEE. *Sub10 Study Group*. 1999. Disponível em: <<http://www.ieee802.org/16/sub10>>. Citado na página 12.
- IEEE. *IEEE 802.16 Task Group 3*. 2000. Disponível em: <<http://www.ieee802.org/16/sub10>>. Citado na página 12.
- IEEE. *IEEE 802.16's Relay Task Group*. 2005. Disponível em: <<http://www.ieee802.org/16/relay>>. Citado na página 12.
- IEEE-SA. *IEEE-SA Standards Board Project Authorization Request (PAR) Form for P802.16*. 2001. Disponível em: <<http://www.ieee802.org/16/docs/01/80216-01>>. Citado na página 12.
- JEONG, K. S. et al. Coordinated voltage and reactive power control strategy with distributed generator for improving the operational efficiency. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, v. 8, n. 6, p. 1261–1268, 2013. ISSN 19750102. Citado na página 1.
- KUNDUR, P.; BALU, N. J.; LAUBY, M. G. *Power system stability and control*. [S.l.]: McGraw-hill New York, 1994. Citado na página 10.
- KUNDUR, P. et al. Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 19, n. 3, p. 1387–1401, 2004. Citado na página 1.
- KUROSE, J. F. et al. *Redes de computadores e a Internet: Uma abordagem top-down*. [S.l.]: Pearson, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 30.
- LAGE, G. G. *O fluxo de potência ótimo reativo com variáveis de controle discretas e restrições de atuação de dispositivos de controle de tensão*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2013. Citado na página 7.
- LAGE, G. G.; FERNANDES, R. A.; COSTA, G. R. da. Functional approximation of power system steady-state voltage stability limits by artificial neural networks. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, Springer, v. 24, n. 4, p. 544–554, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 25.

- LÉVESQUE, M.; MAIER, M. Probabilistic availability quantification of pon and wimax based fiwi access networks for future smart grid applications. *IEEE Transactions on Communications*, IEEE, v. 62, n. 6, p. 1958–1969, 2014. Citado 6 vezes nas páginas 14, 15, 16, 17, 19 e 56.
- LÖF, P. et al. Fast calculation of a voltage stability index. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 7, n. 1, p. 54–64, 1992. Citado na página 25.
- LOIA, V.; VACCARO, A.; VAISAKH, K. A self-organizing architecture based on cooperative fuzzy agents for smart grid voltage control. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, IEEE, v. 9, n. 3, p. 1415–1422, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 1, 4 e 18.
- MARKS, R. B. [STDS-802-16] Fwd: 802.16-2009 Approval Notification. 2009. Disponível em: <<http://www.wirelessman.org/arc/802-16list2/msg05268.html>>. Citado na página 13.
- MILETIC, V. *Method for optimizing availability of optical telecommunication network in presence of correlated failures*. Tese (Doutorado) — University of Zagreb, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 52.
- MOMOH, J. *Smart grid: fundamentals of design and analysis*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 10.
- MONTICELLI, A. J. *Fluxo de carga em redes de energia elétrica*. [S.l.]: E. Blucher, 1983. Nenhuma citação no texto.
- MONTICELLI, A. J.; GARCIA, A. *Introdução a sistemas de energia elétrica*. [S.l.]: Ed Unicamp, 1999. Citado na página 9.
- NIKNAM, T. et al. Multiobjective optimal reactive power dispatch and voltage control: a new opposition-based self-adaptive modified gravitational search algorithm. *IEEE Systems Journal*, IEEE, v. 7, n. 4, p. 742–753, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 24.
- ONS. *Estudo da identificação das ampliações e reforços na rede de transmissão*. 2009. Disponível em: <http://www.ons.org.br/download/ampliacao_reforços/par/PAR2010-2012_TermodeReferencia.pdf>. Citado na página 25.
- PARAMASIVAM, M. et al. Contingency analysis and identification of dynamic voltage control areas. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 30, n. 6, p. 2974–2983, 2015. Citado na página 2.
- PAREIT, D. et al. The history of wimax: A complete survey of the evolution in certification and standardization for ieee 802.16 and wimax. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, v. 14, n. 4, p. 1183–1211, 2012. Citado na página 13.
- RAHIDEH, A.; GITIZADEH, M.; RAHIDEH, A. Fuzzy logic in real time voltage/reactive power control in fars regional electric network. *Electric power systems research*, Elsevier, v. 76, n. 11, p. 996–1002, 2006. Citado na página 18.
- ROBITZKY, L. et al. Evaluating the performance of decentralized analyses of voltage stability and power flows. In: IEEE. *2015 IEEE Eindhoven PowerTech*. [S.l.], 2015. p. 1–6. Citado na página 1.

- SESHADRI, P.; PATTON, A. Bus voltage sensitivity: An instrument for pricing voltage control service. In: IEEE. *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*. [S.l.], 1999. v. 2, p. 703–707. Citado na página 28.
- STOTT, B. Decoupled newton load flow. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 5, n. PAS-91, p. 1955–1959, 1972. Citado na página 9.
- STOTT, B.; ALSAÇ, O. Fast decoupled load flow. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, IEEE, n. 3, p. 859–869, 1974. Citado na página 9.
- STRASSER, T.; SIANO, P.; VYATKIN, V. New trends in intelligent energy systems—an industrial electronics point of view. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, IEEE, v. 62, n. 4, p. 2420–2423, 2015. Citado na página 1.
- SYDNEY, A. et al. Simulative comparison of multiprotocol label switching and openflow network technologies for transmission operations. *IEEE Transactions on Smart Grid*, IEEE, v. 4, n. 2, p. 763–770, 2013. Citado na página 20.
- TARIQ, M. U. et al. Cyber-physical co-simulation of smart grid applications using ns-3. In: ACM. *Proceedings of the 2014 Workshop on ns-3*. [S.l.], 2014. p. 8. Citado na página 3.
- TINNEY, W. F.; HART, C. E. Power flow solution by newton’s method. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Ieee, n. 11, p. 1449–1460, 1967. Citado na página 9.
- VADLAMUDI, V. V.; KARKI, R. Reliability-based appraisal of smart grid challenges and realization. In: IEEE. *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*. [S.l.], 2012. p. 1–7. Citado na página 11.
- WOGRIN, S.; GAYME, D. F. Optimizing storage siting, sizing, and technology portfolios in transmission-constrained networks. *IEEE Transactions on Power System*, IEEE, v. 30, n. 6, p. 3304–3313, 2014. Citado na página 32.
- YAN, Y. et al. A survey on smart grid communication infrastructures: Motivations, requirements and challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, v. 15, n. 1, p. 5–20, 2013. Citado na página 11.
- ZABAIYOU, T.; DESSAINT, L.-A.; KAMWA, I. Preventive control approach for voltage stability improvement using voltage stability constrained optimal power flow based on static line voltage stability indices. *IET Generation, Transmission & Distribution*, IET, v. 8, n. 5, p. 924–934, 2014. Citado 3 vezes nas páginas 1, 4 e 18.
- ZHABELOVA, G.; VYATKIN, V. Multiagent smart grid automation architecture based on iec 61850/61499 intelligent logical nodes. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, IEEE, v. 59, n. 5, p. 2351–2362, 2012. Citado na página 11.
- ZHANG, W. et al. Distributed multiple agent system based online optimal reactive power control for smart grids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, IEEE, v. 5, n. 5, p. 2421–2431, 2014. Citado na página 1.
- ZHANG, Y. et al. Distributed intrusion detection system in a multi-layer network architecture of smart grids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, IEEE, v. 2, n. 4, p. 796–808, 2011. Citado na página 3.

Apêndices

APÊNDICE A – Configuração da rede WiMAX para o sistema de 14 barras

Tabela 36 – Configuração da rede WiMAX para o sistema de 14 barras

Barra I	Barra II	Distância (Km)	Número de Repetidores	Número de Estações Base
1	2	57,4346	3	4
1	5	216,498	13	14
2	3	192,164	11	12
2	4	171,149	10	11
2	5	168,78	10	11
3	4	166,014	10	11
4	5	40,8749	2	3
4	7	1	0	1
4	9	1	0	1
5	6	1	0	1
6	11	193,066	11	12
6	12	248,307	14	15
6	13	126,449	7	8
7	8	1	0	1
7	9	106,783	6	7
9	10	82,0216	4	5
9	14	262,45	15	16
10	11	186,437	11	12
12	13	194,018	11	12
13	14	337,813	20	21

APÊNDICE B – Configuração da rede DWDM para o sistema de 14 barras

Tabela 37 – Configuração da rede WiMAX para o sistema de 14 barras

Barra I	Barra II	Distância (Km)	Número de Repetidores
1	2	57.4346	0
1	5	216.498	2
2	3	192.164	1
2	4	171.149	1
2	5	168.78	1
3	4	166.014	1
4	5	40.8749	0
4	7	1	0
4	9	1	0
5	6	1	0
6	11	193.066	1
6	12	248.307	2
6	13	126.449	1
7	8	1	0
7	9	106.783	1
9	10	82.0216	0
9	14	262.45	2
10	11	186.437	1
12	13	194.018	1
13	14	337.813	3

APÊNDICE C – Configuração da rede WiMAX para o sistema de 57 barras

Tabela 38 – Configuração da rede WiMAX para o sistema de 57 barras

Barra I	Barra II	Distância (Km)	Número de Repetidores	Número de Estações Base
1	2	27,1788	1	2
2	3	82,507	4	5
3	4	35,5265	2	3
4	5	128,128	7	8
4	6	143,659	8	9
6	7	99,0083	5	6
6	8	167,926	10	11
8	9	49,0188	2	3
9	10	162,975	9	10
9	11	82,3128	4	5
9	12	286,348	17	18
9	13	153,366	9	10
13	14	42,1271	2	3
13	15	84,3512	5	6
1	15	88,331	5	6
1	16	199,958	12	13
1	17	104,832	6	7
3	15	51,4455	3	4
4	18	1	0	1
4	18	1	0	1
5	6	62,2199	3	4
7	8	69,1117	4	5
10	12	122,499	7	8
11	13	71,053	4	5
12	13	56,2989	3	4
12	16	78,9155	4	5
12	17	173,75	10	11
14	15	53,0956	3	4
18	19	664,909	40	41

19	20	421,271	25	26
21	20	1	0	1
21	22	113,568	6	7
22	23	14,7542	0	1
23	24	248,492	14	15
24	25	1	0	1
24	25	1	0	1
24	26	1	0	1
26	27	246,55	14	15
27	28	92,6019	5	6
28	29	56,9783	3	4
7	29	1	0	1
25	30	196,075	11	12
30	31	482,423	29	30
31	32	732,856	44	45
32	33	34,9441	2	3
34	32	1	0	1
34	35	75,7123	4	5
35	36	52,125	3	4
36	37	35,5265	2	3
37	38	97,9406	5	6
37	39	36,7884	2	3
36	40	45,2332	2	3
22	38	28,6348	1	2
11	41	1	0	1
41	42	341,676	20	21
41	43	399,916	24	25
38	44	56,7842	3	4
15	45	1	0	1
14	46	1	0	1
46	47	66,0056	3	4
47	48	22,6166	1	2
48	49	125,216	7	8
49	50	124,246	7	8
50	51	213,547	12	13
10	51	1	0	1
13	49	1	0	1

29	52	181,515	10	11
52	53	95,5139	5	6
53	54	225,195	13	14
54	55	219,857	13	14
11	43	1	0	1
44	45	120,557	7	8
40	56	1	0	1
56	41	532,898	32	33
56	42	343,617	20	21
39	57	1	0	1
57	56	252,374	15	16
38	49	171,809	10	11
38	48	46,7863	2	3
9	55	1	0	1

APÊNDICE D – Configuração da rede DWDM para o sistema de 57 barras

Tabela 39 – Configuração da rede DWDM para o sistema de 57 barras

Barra I	Barra II	Distância (Km)	Número de Repetidores
1	2	27,1788	0
2	3	82,507	0
3	4	35,5265	0
4	5	128,128	1
4	6	143,659	1
6	7	99,0083	0
6	8	167,926	1
8	9	49,0188	0
9	10	162,975	1
9	11	82,3128	0
9	12	286,348	2
9	13	153,366	1
13	14	42,1271	0
13	15	84,3512	0
1	15	88,331	0
1	16	199,958	1
1	17	104,832	1
3	15	51,4455	0
4	18	1	0
4	18	1	0
5	6	62,2199	0
7	8	69,1117	0
10	12	122,499	1
11	13	71,053	0
12	13	56,2989	0
12	16	78,9155	0
12	17	173,75	1
14	15	53,0956	0
18	19	664,909	6

19	20	421,271	4
21	20	1	0
21	22	113,568	1
22	23	14,7542	0
23	24	248,492	2
24	25	1	0
24	25	1	0
24	26	1	0
26	27	246,55	2
27	28	92,6019	0
28	29	56,9783	0
7	29	1	0
25	30	196,075	1
30	31	482,423	4
31	32	732,856	7
32	33	34,9441	0
34	32	1	0
34	35	75,7123	0
35	36	52,125	0
36	37	35,5265	0
37	38	97,9406	0
37	39	36,7884	0
36	40	45,2332	0
22	38	28,6348	0
11	41	1	0
41	42	341,676	3
41	43	399,916	3
38	44	56,7842	0
15	45	1	0
14	46	1	0
46	47	66,0056	0
47	48	22,6166	0
48	49	125,216	1
49	50	124,246	1
50	51	213,547	2
10	51	1	0
13	49	1	0

29	52	181,515	1
52	53	95,5139	0
53	54	225,195	2
54	55	219,857	2
11	43	1	0
44	45	120,557	1
40	56	1	0
56	41	532,898	5
56	42	343,617	3
39	57	1	0
57	56	252,374	2
38	49	171,809	1
38	48	46,7863	0
9	55	1	0

APÊNDICE E – Ponto de Operação Inicial CT-2

Tabela 40 – Ponto de Operação Completo CT-2.

Barra	V_k (p.u.)	θ (graus)	P_c (MW)	Q_c (MVar)	P_g (MW)	Q_g (MVar)
1	1,04	0	55	17	497,61	122,369
2	1,01019	-1,2523	3	88	0	-17
3	1	-6,46348	41	21	40	34,6014
4	0,997049	-7,71948	0	0	0	0
5	0,995434	-8,787	13	4	0	0
6	1,00005	-8,86043	75	4	0	25
7	0,996851	-7,49249	0	0	0	0
8	1,005	-4,52332	150	20	450	27,6597
9	0,981761	-9,82347	121	26	0	9
10	0,976693	-12,199	5	2	0	0
11	0,972738	-10,6232	0	0	0	0
12	1,015	-10,9796	377	24	310	141,117
13	0,976301	-10,3679	18	2,3	0	0
14	0,963827	-10,0979	10,5	5,3	0	0
15	0,991756	-7,66333	22	5	0	0
16	1,01302	-9,2226	43	3	0	0
17	1,01705	-5,58489	42	8	0	0
18	1,01526	-12,1125	27,2	9,8	0	0
19	0,972772	-13,6723	3,3	0,6	0	0
20	0,95889	-13,9559	2,3	1	0	0
21	0,994517	-13,8822	0	0	0	0
22	0,993853	-13,8438	0	0	0	0
23	0,992837	-13,8847	6,3	2,1	0	0
24	0,990646	-13,8004	0	0	0	0
25	0,992539	-17,9671	3,3	0,6	0	0
26	0,949248	-13,4439	0	0	0	0
27	0,967562	-11,4527	9,3	0,5	0	0
28	0,981297	-10,2126	4,6	2,3	0	0
29	0,994167	-9,36855	17	2,6	0	0
30	0,971867	-18,6346	3,6	1,8	0	0

31	0,943127	-19,6278	5,8	2,9	0	0
32	0,94643	-19,0028	1,6	0,8	0	0
33	0,944127	-19,0428	3,8	1,9	0	0
34	0,948481	-15,15	0	0	0	0
35	0,954323	-14,9205	6	3	0	0
36	0,963121	-14,6513	0	0	0	0
37	0,971424	-14,4698	0	0	0	0
38	0,995661	-13,7547	14	7	0	0
39	0,970033	-14,5255	0	0	0	0
40	0,960328	-14,6662	0	0	0	0
41	0,991237	-14,7264	6,3	3	0	0
42	0,95842	-16,2281	7,1	4,4	0	0
43	1,00723	-11,8405	2	1	0	0
44	0,994122	-12,7489	12	1,8	0	0
45	1,00215	-9,8146	0	0	0	0
46	1,0402	-12,7087	29,7	16	0	0
47	1,01465	-13,8353	29,7	11,6	0	0
48	1,00997	-13,8199	0	0	0	0
49	1,02357	-14,0198	18	8,5	0	0
50	1,00853	-14,5493	21	10,5	0	0
51	1,03453	-13,7091	29,7	16,6	0	0
52	0,989303	-10,2646	0	0	0	0
53	0,986821	-10,74	4,1	1,4	0	0
54	0,977198	-10,7932	4,1	1,4	0	0
55	0,978563	-10,4482	6,8	3,4	0	0
56	0,957387	-16,7966	7,6	2,2	0	0
57	0,95082	-17,3328	6,7	1,4	0	0

APÊNDICE F – Ponto de operação do CT-2 após execução dos ajustes de controle da metodologia MaxQ

Tabela 41 – Ponto de Operação Final CT-2 após execução dos ajustes de controle da metodologia MaxQ

Barra	V_k (p.u.)	θ (graus)	P_c (MW)	Q_c (MVar)	P_g (MW)	Q_g (MVar)
1	1,05	0	55	17	497,025	144,685
2	1,01798	-1,19109	3	88	0	-17
3	1	-6,20892	41	21	40	8,17364
4	1,0001	-7,51904	0	0	0	0
5	1,00316	-8,67883	13	4	0	0
6	1,01	-8,80004	75	4	0	21,5839
7	1,01241	-7,53481	0	0	0	0
8	1,025	-4,70814	150	20	450	55,8259
9	0,994044	-9,7455	121	26	0	9
10	0,982222	-11,9805	5	2	0	0
11	0,981254	-10,4691	0	0	0	0
12	1,015	-10,6989	377	24	310	115,756
13	0,981485	-10,1658	18	2,3	0	0
14	0,968979	-9,89603	10,5	5,3	0	0
15	0,996378	-7,4809	22	5	0	0
16	1,01605	-8,99324	43	3	0	0
17	1,02359	-5,43871	42	8	0	0
18	1,01895	-11,8768	27,2	9,8	0	0
19	0,977761	-13,4412	3,3	0,6	0	0
20	0,964634	-13,7331	2,3	1	0	0
21	1,00159	-13,6421	0	0	0	0
22	1,0011	-13,6069	0	0	0	0
23	1,00028	-13,6503	6,3	2,1	0	0
24	1,00118	-13,6182	0	0	0	0
25	1,00328	-17,7032	3,3	0,6	0	0
26	0,959824	-13,2599	0	0	0	0

ANEXO F. Ponto de operação do CT-2 após execução dos ajustes de controle da metodologia MaxQ

27	0,980983	-11,3647	9,3	0,5	0	0
28	0,995665	-10,1762	4,6	2,3	0	0
29	1,00905	-9,3688	17	2,6	0	0
30	0,982621	-18,3518	3,6	1,8	0	0
31	0,953656	-19,3118	5,8	2,9	0	0
32	0,955931	-18,6751	1,6	0,8	0	0
33	0,953652	-18,7143	3,8	1,9	0	0
34	0,95636	-14,905	0	0	0	0
35	0,962034	-14,6761	6	3	0	0
36	0,970675	-14,4082	0	0	0	0
37	0,978835	-14,2269	0	0	0	0
38	1,00259	-13,5138	14	7	0	0
39	0,977487	-14,2826	0	0	0	0
40	0,967926	-14,4238	0	0	0	0
41	1,00009	-14,5003	6,3	3	0	0
42	0,967406	-15,9677	7,1	4,4	0	0
43	1,01613	-11,6652	2	1	0	0
44	1,00058	-12,5148	12	1,8	0	0
45	1,00751	-9,60037	0	0	0	0
46	1,04635	-12,4745	29,7	16	0	0
47	1,02118	-13,5883	29,7	11,6	0	0
48	1,01661	-13,5752	0	0	0	0
49	1,03004	-13,7728	18	8,5	0	0
50	1,01498	-14,2976	21	10,5	0	0
51	1,04061	-13,4709	29,7	16,6	0	0
52	1,00388	-10,232	0	0	0	0
53	1,00122	-10,6902	4,1	1,4	0	0
54	0,990829	-10,713	4,1	1,4	0	0
55	0,9913	-10,3505	6,8	3,4	0	0
56	0,966199	-16,5182	7,6	2,2	0	0
57	0,959486	-17,038	6,7	1,4	0	0

APÊNDICE G – Ponto de Operação do CT-2 após execução dos ajustes de controle da metodologia VSF

Tabela 42 – Ponto de Operação Final do CT-2 após execução dos ajustes de controle da metodologia VSF

Barra	V_k (p.u.)	θ (graus)	P_c (MW)	Q_c (MVar)	P_g (MW)	Q_g (MVar)
1	1,04	0	55	17	497,258	120,22
2	1,01019	-1,25037	3	88	0	-17
3	1	-6,45537	41	21	40	22,7333
4	1,00008	-7,76658	0	0	0	0
5	1,00315	-8,92841	13	4	0	0
6	1,01	-9,0506	75	4	0	21,7135
7	1,01232	-7,78633	0	0	0	0
8	1,025	-4,9597	150	20	450	56,8679
9	0,993589	-9,99408	121	26	0	9
10	0,981811	-12,2346	5	2	0	0
11	0,980323	-10,7093	0	0	0	0
12	1,015	-10,9546	377	24	310	126,065
13	0,980208	-10,398	18	2,3	0	0
14	0,967092	-10,1156	10,5	5,3	0	0
15	0,993687	-7,67401	22	5	0	0
16	1,01304	-9,20476	43	3	0	0
17	1,01707	-5,57562	42	8	0	0
18	1,01876	-12,1272	27,2	9,8	0	0
19	0,977021	-13,6805	3,3	0,6	0	0
20	0,963558	-13,9649	2,3	1	0	0
21	0,999925	-13,8791	0	0	0	0
22	0,999355	-13,8419	0	0	0	0
23	0,998553	-13,8858	6,3	2,1	0	0
24	0,99988	-13,8614	0	0	0	0
25	1,00178	-17,9592	3,3	0,6	0	0
26	0,958668	-13,5009	0	0	0	0

ANEXO G. Ponto de Operação do CT-2 após execução dos ajustes de controle da metodologia VSF

27	0,980398	-11,6135	9,3	0,5	0	0
28	0,995294	-10,4279	4,6	2,3	0	0
29	1,00882	-9,62289	17	2,6	0	0
30	0,981049	-18,609	3,6	1,8	0	0
31	0,951952	-19,5705	5,8	2,9	0	0
32	0,954136	-18,9294	1,6	0,8	0	0
33	0,951853	-18,9688	3,8	1,9	0	0
34	0,954563	-15,1467	0	0	0	0
35	0,960239	-14,9168	6	3	0	0
36	0,968891	-14,6478	0	0	0	0
37	0,977047	-14,465	0	0	0	0
38	1,00077	-13,7471	14	7	0	0
39	0,975705	-14,5213	0	0	0	0
40	0,966156	-14,6641	0	0	0	0
41	0,998884	-14,75	6,3	3	0	0
42	0,966056	-16,2173	7,1	4,4	0	0
43	1,01509	-11,908	2	1	0	0
44	0,998568	-12,7398	12	1,8	0	0
45	1,00514	-9,8034	0	0	0	0
46	1,04435	-12,7018	29,7	16	0	0
47	1,0193	-13,8203	29,7	11,6	0	0
48	1,01478	-13,8086	0	0	0	0
49	1,02846	-14,0127	18	8,5	0	0
50	1,01372	-14,5456	21	10,5	0	0
51	1,03999	-13,7288	29,7	16,6	0	0
52	1,00359	-10,485	0	0	0	0
53	1,00091	-10,9426	4,1	1,4	0	0
54	0,990451	-10,9637	4,1	1,4	0	0
55	0,990868	-10,5993	6,8	3,4	0	0
56	0,964748	-16,7651	7,6	2,2	0	0
57	0,957966	-17,2846	6,7	1,4	0	0

APÊNDICE H – Dados da Análise AVD do CT-2 para a metodologia VSF

Neste apêndice são exibidos os atrasos e os volume de dados transmitidos, para execução dos ajustes de controle determinados pela metodologia VSF, nas redes WiMAX e DWDM. Os dois ajustes de controle são executados na barra 8 e ambas as tecnologias transmitem seis pacotes (6114 *Bytes*).

Tabela 43 – Tempos mínimo e máximo para execução da VSF na rede WiMAX

Iteração	Barra 1	Barra 3	Barra 8	Barra 12
1	-	-	549 / 570	-
2	-	-	561 / 581	-

Tabela 44 – Tempos mínimo e máximo para execução da VSF na rede DWDM

Iteração	Barra 1	Barra 3	Barra 8	Barra 12
1	-	-	140 / 160	-
2	-	-	150 / 170	-

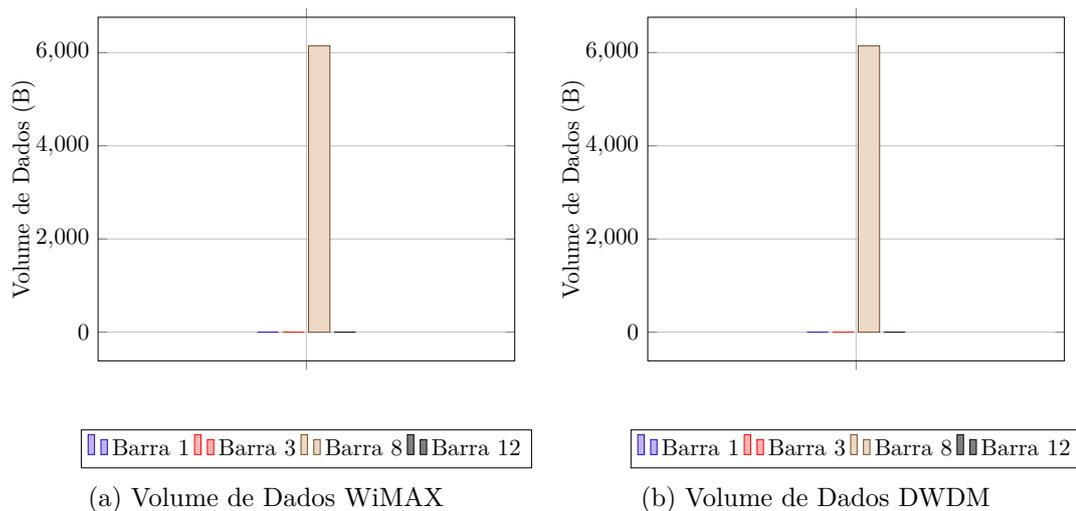


Figura 19 – Volume de dados para a execução dos ajustes de controle da metodologia VSF no CT-2