

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

HALINE RAISSA PAULAS ONORIO

**ANÁLISE DE CONTINGÊNCIA COM CRITÉRIO $N - 1_{linhas}$ E COMPENSAÇÃO
DE REATIVOS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO**

MEDIANEIRA

2022

HALINE RAISSA PAULAS ONORIO

**ANÁLISE DE CONTINGÊNCIA COM CRITÉRIO $N - 1_{linhas}$ E COMPENSAÇÃO
DE REATIVOS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO**

**Contingency analysis with $N - 1_{lines}$ criterion and reactive compensation on
transmission lines**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Cristiane Lionço de Oliveira.

Coorientador(a): Diogo Marujo.

MEDIANEIRA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

HALINE RAISSA PAULAS ONORIO

**ANÁLISE DE CONTINGÊNCIA COM CRITÉRIO $N - 1$ _{linhas} E COMPENSAÇÃO
DE REATIVOS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 24/junho/2022

Cristiane Lionço de Oliveira
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Diogo Marujo
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Evandro André Knopatzki
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Hugo Andrés Ruiz Flórez
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

MEDIANEIRA

2022

Dedico este trabalho a meus pais, pelo apoio e incentivo nestes anos de curso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente aos meus pais e irmão por todo apoio incondicional nesta trajetória, por toda compreensão, palavras de suporte e incentivo, pelo tempo dedicado e custos oferecidos em meu auxílio. O caminho teria sido muito mais árduo sem o apoio deles.

Agradeço a Sara Rodrigues Ferreira pela amizade, que mesmo de forma indireta me ajudou em momentos de enorme dificuldades no curso. Assim como ao Marco Antônio da Silva pelo carinho e motivação nesta última fase.

Agradeço a Doutora Rosiane Delgado pelos conselhos de como manter a inteligência emocional frente a novos desafios e obstáculos.

Agradeço a minha orientadora Prof.(a) Dr.(a) Cristiane Lionço de Oliveira, bem como ao meu coorientador Prof. Dr. Diogo Marujo, pelo apoio, tempo e conhecimento com que me guiaram ao longo deste capítulo.

Aos meus colegas da universidade.

A toda a minha família.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização deste trabalho e conclusão desta etapa da minha trajetória.

RESUMO

Com o contínuo crescimento da demanda por energia elétrica, estudos voltados à área de controle e operação do sistema elétrico nacional tornam-se imperativos na perspectiva de garantir qualidade, confiabilidade e segurança no fornecimento de energia. O objetivo deste trabalho de conclusão de curso foi realizar estudos de contingenciamento em linhas de transmissão com critério $N - 1_{linhas}$ de três subsistemas, equivalente, referente a região Sul, Sudeste e Mato Grosso (STB107CA) e a avaliação de possíveis compensações reativas em derivação a barras do sistema com o intuito de minimizar o sobrecarregamento das linhas de transmissão e garantir a estabilidade de tensão nas barras pós contingência. Visando análises criteriosas em relação ao local a receber a compensação reativa e o montante de potência a ser alocado, foi realizada a otimização do fluxo de potência do sistema, considerando duas funções objetivos, a máxima transferência de potência e o controle de tensão. No que tange à análise de contingência, três cenários iniciais foram alcançados: contingências nas quais não foi possível alcançar a convergência do sistema-teste, contingências que resultaram em violação do fluxo de potência nas linhas de transmissão e, ou da tensão nas barras e por fim, contingências que não apresentaram violações nos parâmetros analisados do sistema. Neste aspecto ainda, foi possível avaliar que a transmissão do fluxo de potência de uma linha, quando além de seu limite, resulta na queda da magnitude de tensão ao longo das linhas adjacentes. Assim como verificou-se que os casos de contingência que resultaram em violações de fluxo de potência ocorreram em sua maioria em regiões do sistema na qual a conexão entre barras era realizada somente por meio da linha contingenciada, na qual seu comprometimento resulta no sobrecarregamento do fluxo de potência de linhas vizinhas. A compensação de reativos apresentou resultados significativos quando aplicada à eliminação das violações de tensão e recuperação dos níveis de tensão pós contingência. Porém, quando aplicado a eliminação ou mesmo a minimização das violações do fluxo de potência, a compensação mostrou-se pouco relevante.

Palavras-chave: sistemas elétricos de energia; energia elétrica; transmissão de energia elétrica.

ABSTRACT

With the steady growth in demand for electricity, studies focused on the area of control and operation of the system become imperative in terms of ensuring quality, reliability, security and safety in energy supply. This work aims to carry out contingency studies on transmission lines with $N - 1_{line}$ criterion in three national subsystems, equivalent, referring to the South, Southeast and Mato Grosso (STB107CA) and the evaluation of possible shunt compensation in order to minimize the overloading of the transmission lines and ensure the voltage stability in the bars after the contingency. Aiming at careful analyses in relation to the place to receive compensation and the amount to be allocated, the optimization of the power flow was performed considering two objective functions, maximum power transfer and voltage control. Regarding contingency analysis, four scenarios were achieved: a first in which convergence could not be achieved, another of cases that resulted in violation of the power flow, cases that resulted in violation of voltage and finally, cases that did not present violations in the analyzed parameters of the system. In this aspect, it was also possible to evaluate that the transmission capacity of a line, when beyond its limit, results in the drop of the voltage along the adjacent lines. As well as it found that contingency cases that resulted in breaches of the power flow, occurred mostly in system regions in which the connection between buses was performed only through the contingent line, in which its compromise results in overloading the power flow of neighboring lines. Reactive compensation showed significant results when applied to elimination of voltage violation and recovery of post contingency voltage levels, however, was not very relevant when the elimination or even minimization of power flow violations was applied.

Keywords: power system; electrical energy; electric power transmission.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Perfil de tensão	22
Figura 2 - Fluxograma da metodologia proposta.....	24
Figura 3 - Diagrama unifilar do Sistema Teste Brasileiro de 107 barras - (STB-107CA).....	29
Figura 4 - Caso 78: Barras indicadas a compensação reativa	40
Figura 5 - Caso 78: Função DFTR e DARI.....	40
Figura 6 - LT's barra 225-Itumbiara e 231-Rio Verde.....	42
Figura 7 - Caso 93: Barras indicadas a compensação reativa	43
Figura 8 - LT's barra 4703-Cuiabá e 4533-Caxipó	44
Figura 9 - Caso 13: Barras indicadas a compensação reativa	46
Figura 10 - LT's barra 233-Samambaia e 320-Emborcação	48
Figura 11 - LT's barra 101-Araraquara e 102-P.Caldas	50
Figura 12 - Caso 5: Tensão na barra 140 em condições normais de operação	51
Figura 13 - Caso 5: Tensão na barra 140 após contingência.....	52
Figura 14 - Caso 5: Tensão na barra 140 após a contingência com adição da com- pensação.....	52
Figura 15 - LT's barra 104-C.Paulista e 1503-Itajubá.....	54
Figura 16 - Caso 9: Barras indicadas a compensação reativa	55
Figura 17 - Caso 9: Tensão nas barras com violação após a contingência	56
Figura 18 - Caso 9: Tensão nas barras com violação após a contingência com adi- ção da compensação	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tensões entre fases admissíveis a 60hz.....	26
Tabela 2 - Casos de contingência simulados.....	30
Tabela 3 - Resultado das simulações dos casos de contingência	32
Tabela 4 - Casos de não convergência do fluxo de potência após contingência.....	33
Tabela 5 - Barras de referência em casos de não convergência	34
Tabela 6 - Caso 43: Relatório de monitoração da tensão	35
Tabela 7 - Casos de contingência com violações de fluxo	35
Tabela 8 - Casos de contingência com violações de tensão.....	37
Tabela 9 - Caso 78: Potência reativa alocada.....	41
Tabela 10 - Caso 78: Análise de contingência antes e após compensação	41
Tabela 11 - Caso 93: Potência reativa alocada.....	43
Tabela 12 - Caso 93: Análise de contingência antes e após compensação	44
Tabela 13 - Caso 13: Violações do fluxo de potência	46
Tabela 14 - Caso 13: Potência reativa alocada.....	47
Tabela 15 - Caso 13: Análise de contingência antes e após compensação	47
Tabela 16 - Caso 5: Violações de tensão.....	50
Tabela 17 - Caso 5: Potência reativa alocada.....	51
Tabela 18 - Caso 5: Comparação das tensões nas barras analisadas (pu).....	53
Tabela 19 - Caso 9: Violações de tensão.....	55
Tabela 20 - Caso 9: Potência reativa alocada.....	55
Tabela 21 - Caso 9: Comparação das tensões nas barras analisadas (pu).....	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANAREDE	Programa de Análise de Redes
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASHN	Custo de Instalação de Shunt Reativo
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CLTN	Controle de Tensão
CTAP	Controle do Tap do Transformador
DARI	Dados de Áreas de Interesse
DCAQ	Dados de Injeção Reativa, Instalação de <i>Shunt</i> Reativo
DTRF	Dados de Área Cujos Fluxos de Ativos Devem ser Maximizados na Função Objetivo de Máxima Transferência
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FLUPOT	Programa Fluxo de Potência Ótimo
FPO	Fluxo de Potência Ótimo
HPVM	High Performance Machine
LT	Linhas de Transmissão
MME	Ministério de Minas e Energia
MXTR	Função Objetivo Máxima Transferência de Tensão
PVM	Parallel Virtual Machine
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIL	Surge Impedance Loading
SIN	Sistema Interligado Nacional

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
2.1	Estudo do Fluxo de Potência	15
2.1.1	Fluxo de Potência pelo Método de Newton	16
2.2	Fluxo de Potência Ótimo	17
2.3	Análise de Contingências.....	19
2.4	Compensação de Reativos em Linhas de Transmissão	20
3	METODOLOGIA	23
3.1	Determinação do Ponto Operativo do Sistema.....	24
3.2	Análise de Contingência com Critério $N - 1_{linhas}$	24
3.3	Determinação das Barras Críticas	26
3.4	Compensação de Reativos Sugerida.....	27
3.5	Avaliação da Compensação	27
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	28
4.1	Análise de Contingência com Critério $N - 1_{linhas}$ do sistema - STB-107CA.....	28
4.2	Análise da Compensação de Reativos	38
4.2.1	Casos de Contingência com Violações do Fluxo de Potência.....	38
<u>4.2.1.1</u>	<u>Caso 78</u>	<u>39</u>
<u>4.2.1.2</u>	<u>Caso 93.....</u>	<u>43</u>
4.2.2	Casos de Contingência com Violações do Fluxo de Potência e Tensão.....	45
4.2.3	Casos de Contingência com Violação de Tensão	49
<u>4.2.3.1</u>	<u>Caso 5.....</u>	<u>50</u>
<u>4.2.3.2</u>	<u>Caso 9.....</u>	<u>54</u>
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
	REFERÊNCIAS.....	61
	APÊNDICE A - Formulação Inicial do Estado do Fluxo de Potên- cia.....	65
	APÊNDICE B - Fórmulas dos Índices de Severidade Utilizadas pa- ra Classificação das Contingências.....	69
	ANEXO A - Código Flupot Utilizado para Análise dos Casos de Contingência com Violação de Fluxo de Potência.....	72

1 INTRODUÇÃO

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) é formado por complexas interconexões envolvendo as cargas, a geração, a transmissão e a distribuição da energia elétrica. No caso particular do sistema brasileiro, a geração e transmissão nacional estão inseridas no Sistema Interligado Nacional (SIN), o qual é subdividido em quatro grandes sistemas: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e região Norte (ONS, 2019).

Com a crescente demanda por energia elétrica, estudos relacionados à expansão dos sistemas de geração e transmissão, assim como estudos concernentes ao planejamento da operação do SIN frente a variações de cargas, eventuais contingências e, ou perturbações mais severas são essenciais para o estabelecimento das margens de segurança e ações preventivas a serem tomadas a fim de garantir a confiabilidade no fornecimento da energia elétrica (DELGADO, 2018; QUIZHPI, 2014).

As análises de contingências, simples e múltiplas, encontram-se inseridas no planejamento de operação e diretrizes para estudos estáticos do SEP gerenciado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Silva (2013) salienta a importância que estas análises possuem para operação do sistema em tempo real, considerando a delimitação de estratégias operativas que minimizem o impacto de uma eventual contingência do sistema e ao consumidor final.

De acordo com Silva (2013) diversos e abrangentes estudos voltados à análise de contingência estão presentes na literatura. Neste cenário (BIRCHAL et al., 2000) aplicou estudos voltados ao processamento paralelo à análise de contingências, implementando os *softwares* PVM (Parallel Virtual Machine) e HPVM (High Performance Machine) visando o aumento do desempenho computacional e constatando ganhos significativos neste aspecto. Ao passo que (SOUZA et al., 2003) estudou a utilização da norma do vetor tangente para análise de contingências no SEP, voltadas à estabilidade de tensão, com o objetivo de identificar os casos mais críticos, constatando a aplicabilidade efetiva do método. Já (LENTZ et al., 2018) realizou estudos comparativos entre metodologias empregues para classificação de contingências críticas em linhas de transmissão (LT) do SEP visando encontrar discrepâncias e similaridades entre as mesmas, concluindo que as metodologias

baseadas na margem de carga ativa e reativa apresentaram maior similaridade em relação as voltadas ao desempenho da tensão.

Sousa (2003) destaca que eventos e perturbações severas que resultam na perda de um ou mais elementos da rede, assim como alterações no sistema decorrentes da crescente elevação da demanda por energia elétrica podem originar o comprometimento de diversos parâmetros operacionais que compõem o sistema.

Dentro do escopo envolvendo o planejamento da operação do sistema encontram-se medidas objetivando atenuar e, ou eliminar estes problemas, como o redespacho da geração, o corte de carga, a inserção de compensação de reativos, a alocação de equipamentos de controle de rede e a estruturação de novas LT's e subestações. A compensação de reativos, neste aspecto, estabelece um melhor aproveitamento da rede, do controle dos parâmetros operacionais, assim como uma alternativa economicamente atrativa (CHAVES, 2007).

A utilização de metodologias visando análises criteriosas da compensação de reativos acerca do local a receber a compensação, o tipo e montante a ser alocado tornam-se fundamentais para o alcance de melhores resultados em sistemas pós contingências, sendo o Fluxo de Potência Ótimo (FPO) amplamente utilizado em estudos correlatos ao planejamento da operação do sistema frente a possíveis falhas, (JUNIOR, 2013; SESSA, 2013).

Dentre os diversos estudos que abrangem o SEP, o *software* Análise de Redes Elétricas (ANAREDE) é amplamente utilizado. Desenvolvido pelo Centro de Pesquisas em Engenharia Elétrica (CEPEL) e possuindo órgãos como o Ministério de Minas e Energia (MME), o Operador Nacional do Sistema Elétrico e a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) como usuários, o *software* permite a realização de diversos estudos voltados ao SEP, (BARAN, 2017).

O presente trabalho tem como objetivo principal avaliar o comportamento do fluxo de potência e da tensão nas barras do sistema quando realizado o contingenciamento das linhas de transmissão que compõem o sistema-teste STB-107CA, (ALVES, 2007), como a avaliação da compensação de reativos *shunt* nas barras sob análise pós contingência, com o intuito de minimizar o sobrecarregamento das linhas e garantir a estabilidade de tensão do sistema.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo é definido o estudo do fluxo de potência de maneira geral e mais especificamente sua solução por meio do método de Newton-Raphson. Também é apresentada uma síntese a respeito do fluxo de potência ótimo, assim como discutidos conceitos a respeito da análise de contingência e compensação de reativos.

2.1 Estudo do Fluxo de Potência

Os estudos do fluxo de potência são de grande relevância para o planejamento da expansão e operação dos sistemas elétricos de potência. Os dados obtidos por meio da análise do fluxo permitem que o sistema opere em condições mais seguras e confiáveis (STEVENSON, 1986).

De acordo com o Submódulo 23.3 de *Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos do Procedimento de Rede*, disponibilizado pela ONS, os estudos de fluxo de potência tem como objetivo determinar o estado em que o sistema está operando em regime estático, ou seja, sem efeitos de transitórios. São analisados os níveis de tensão nas barras do sistema, os níveis de carregamento dos geradores, das linhas de transmissão e dos demais componentes de transmissão, a fim de avaliar se, para determinado nível de geração, carga e configuração da rede, os critérios de operação e segurança são satisfeitos.

O fluxo de potência do sistema pode ser obtido através da resolução de uma sequência de equações algébricas não lineares que modelam o sistema em regime estático. Usualmente este cálculo é realizado por meio de métodos computacionais, uma vez que para análises de fluxo de carga com maior complexidade, as equações que associam as injeções de potência ativa e reativa, e tensão nas barras do sistema assumem grandes dimensões (MONTICELLI, 1983).

Diversos métodos iterativos podem ser utilizados na resolução do fluxo de potência, uma análise criteriosa referente à topologia da rede a ser estudada, sua dimensão e demais especificidades devem ser consideradas antes da escolha do método de resolução a ser aplicado, tendo em vista que cada método possui suas vantagens e restrições (DURCE, 2012).

O desenvolvimento de métodos computacionais para análise da rede elétrica utilizado pelas concessionárias nacionais é de responsabilidade do CEPEL. O *software* ANAREDE é o programa computacional mais utilizado para estudos referentes ao sistema elétrico de potência em regime estático.

Segundo o Manual do Usuário do ANAREDE (CEPEL, 2011), a análise do fluxo de potência tem início com o cálculo da condição em que o sistema está operando quando definidas as condições de geração, carga, topologia e restrições operacionais.

2.1.1 Fluxo de Potência por meio do Método de Newton-Raphson

A solução para as equações algébricas não lineares que modelam o problema do fluxo de potência podem ser obtidas por meio de diversos métodos iterativos, sendo o método de Newton-Raphson e seus derivados os mais eficientes e utilizados nesta resolução (MONTICELLI, 1983).

O método de Newton-Raphson baseia-se na expansão da série de Taylor para uma função de duas ou mais variáveis, de maneira na qual uma aproximação é realizada através de uma estimativa inicial das variáveis a serem obtidas (SAADAT, 1999; STEVENSON, 1986).

De acordo com Júnior R. (2005) e Monticelli (1983) a resolução do problema do fluxo de potência através do método de Newton-Raphson pode ser obtida por meio dos seguintes passos:

1. Fazer $i = 0$ e escolher uma solução inicial para $P^{(i)}$ e $Q^{(i)}$, ou seja, definir os valores iniciais para:
 - Magnitude da tensão $V_k^{(i)}$ nas barras de carga PQ, normalmente estimadas em 1 pu;
 - Ângulo das tensões $\theta_k^{(i)}$ nas barras de carga PQ e nas barras de tensão PV, normalmente estimadas em 0° .
2. Calcular $f(P, Q^{(i)}) = \begin{bmatrix} \Delta P^{(i)} \\ \Delta Q^{(i)} \end{bmatrix}$, sendo:

- $P_k(V^{(i)}, \theta^{(i)})$ para as barras PQ e PV;
 - $Q_k(V^{(i)}, \theta^{(i)})$ para as barras PQ.
3. Testar a convergência do valor calculado em relação ao índice de tolerância especificado ε , se $|f(P, Q^{(i)})| \leq \varepsilon$ o processo convergiu para a solução. Caso contrário, seguir para o próximo passo;
 4. Calcular a matriz Jacobiana J^i e determinar os valores de ΔV^i e $\Delta \theta^i$;
 5. Determinar uma nova solução (V^{i+1}, θ^{i+1}) ;
 6. Fazer $i = i + 1$ e voltar para o passo 2.

De acordo com Saadat (1999) o método de Newton-Raphson apresenta uma rápida convergência e um bom nível de precisão, assim como um bom desempenho computacional, exigindo pouca memória para sua resolução. Cabe destacar, porém, que possui certa limitação. O método depende do valor inicial estimado, podendo não convergir para a solução para alguns valores iniciais arbitrários.

2.2 Fluxo de Potência Ótimo

O SEP, quando avaliado em regime permanente, deve estar dentro dos limites operacionais estabelecidos pelos órgãos regulamentadores de energia elétrica (Aneel, ONS etc.), os quais definem diretrizes e limites a serem respeitados a fim de que os equipamentos que integram o sistema operem dentro de condições seguras, (DAHLKE, 2010).

Ainda segundo Dahlke (2010), os equipamentos que compõem o sistema (barras geradoras, linhas de transmissão, transformadores, reatores de potência etc.) devem não apenas operar dentro dos limites de segurança, mas também operar de forma ótima, em condições que maximizem a eficiência do sistema elétrico.

A formulação matemática inicial para a otimização da operação do sistema elétrico, considerando uma função objetivo, foi proposto por Carpentier (1962), o qual denominou de Fluxo de Potência Ótimo (FPO).

O FPO tem como objetivo determinar a condição ótima de operação do sistema elétrico, considerando uma função objetivo e satisfazendo um conjunto de restrições de igualdade e desigualdade, (ROSAS, 2008; MIKILITA, 2005).

Ainda segundo Rosas (2008), o cálculo do FPO difere-se do cálculo convencional do fluxo de potência, por considerar os parâmetros do sistema como sujeitos a ajustes, com a finalidade de otimizar uma função objetiva, enquanto paralelamente considera as restrições impostas para o sistema.

Mikilita (2005) representa a formulação matemática característica do problema de FPO por meio das equações (1), (2) e (3):

$$\text{Min} = f(u) \quad (1)$$

s. a

$$g(u) = 0 \quad (2)$$

$$h^{\min} \leq h(u) \leq h^{\max} \quad (3)$$

O vetor de restrições de igualdade é formado pelas equações (5) e (6), encontradas no Apêndice A, que no problema do fluxo de potência convencional, representam o balanço de potência ativa e reativa no sistema. Em consonância com a função a ser otimizada, alguns controles do sistema podem ser fixados para estudo, tornando-se assim, parte das restrições de igualdade, (SESSA, 2013).

Onde:

- $f(u)$ – função objetivo a ser otimizada;
- u – vetor de variáveis de otimização do sistema;
- $g(u)$ – vetor de restrições de igualdade;
- $h(u)$ – vetor de restrições de desigualdade.

Por outro lado, o vetor de restrições de desigualdade é formado por inequações que definem os limites físicas e operacionais do sistema, como exemplo

podem ser citados o módulo de tensão nos barramentos, assim como os limites potência ativa e reativa gerada. Cabe destacar ao fim, que estes limites podem ser definidos a partir de condições normais de operação ou condições de emergência. (SESSA, 2013; MIKILITA, 2005).

A datar da formulação matemática inicial proposta por Carpentier (1962), diversos métodos foram apresentados para resolução do problema FPO, sendo o Método dos Pontos Interiores o que mais utilizado. De maneira geral o método procura restringir a busca pela solução dentro da área delimitada pelas restrições impostas ao problema, simplificando assim a função objetivo, (JUNIOR, 2013; SESSA, 2013).

2.3 Análise de Contingências

O sistema elétrico de potência, operando em regime permanente, está sujeito a restrições de segurança, que constituem uma série de contingências previamente estabelecidas (MONTICELLI, 1983).

A saída repentina ou o desligamento de um componente do SEP caracteriza uma contingência, devido a alguma falha ou evento ao longo do sistema que resulta na atuação dos dispositivos de proteção. As contingências prováveis a serem executadas no SEP incluem a retirada de uma linha de transmissão, a retirada de transformadores, a abertura de uma extremidade da linha, assim como a perda de geração, de carga ou de um elemento *shunt* (PATACA, 2012).

O conjunto de contingências a serem executadas pode representar um evento simples com critério $N_{linhas} - 1$, onde um componente do sistema é retirado de operação, assim como uma combinação de múltiplos eventos no qual uma série de componentes saem de operação ao mesmo tempo.

De acordo com Monticelli (1983) uma lista de contingências a serem executadas, fundamentadas nas restrições de segurança, com todas as contingências possíveis é inviável. Normalmente são processadas contingências simples e um número restrito de contingências múltiplas, levando em consideração a probabilidade de falhas e um prévio conhecimento do comportamento do sistema.

O Programa de Análise de Contingência, disponibilizado pelo *software* ANAREDE, executa em sequência uma série de casos de contingências a fim de

determinar falhas ou dificuldades operativas do sistema. Por meio da solução do fluxo de potência é possível monitorar o estado operativo da rede elétrica em contraponto com as restrições previamente impostas e assim com os dados obtidos torna-se possível determinar o índice de severidade para prováveis violações (CEPEL, 2011).

Os pontos de monitoramento abrangem um conjunto de restrições de carga e operação. Nas restrições referentes à carga, é realizada a monitoração dos limites de injeção de potência ativa e reativa nas barras PQ, assim como os limites de injeção de potência ativa nas barras PV. O monitoramento concernente às restrições operacionais inclui o controle dos limites das magnitudes de tensões nas barras do sistema, o fluxo de potência entre as linhas de transmissão e transformadores, assim como o limite de potência reativa injetado nas barras PV, (MONTICELLI, 1983).

No estudo realizado neste trabalho, foram consideradas apenas contingências com critério $N_{linhas} - 1$, considerando a retirada de linhas de transmissão do sistema elétrico. Esta ação influi diretamente nos níveis da magnitude de tensão nas barras do sistema, assim como no intercâmbio do fluxo de potência entre as linhas de transmissão.

2.4 Compensação de Reativos em Linhas de Transmissão

A compensação de reativos traz benefícios importantes para o sistema elétrico de potência. Uma compensação adequada contribui para a redução das perdas do sistema, garantindo o equilíbrio entre consumo e geração de reativos. Além de estar diretamente correlacionada com a ampliação da capacidade de transmissão de uma linha, permitindo um melhor aproveitamento da rede elétrica (BRITO, 2015; SILVA, 2007).

Segundo Stevenson (1986), o comportamento da linha de transmissão pode ser melhorado por meio da compensação reativa do tipo série ou paralela.

De maneira geral, quando bancos de capacitores ou reatores são inseridos com o objetivo de gerar ou absorver reativos, diz-se que a linha de transmissão recebeu uma compensação paralela, ou *shunt*. (REZENDE et al., 2013).

A concepção do termo compensação está relacionada a uma propriedade intrínseca das linhas de transmissão de consumir energia reativa, em maior ou menor quantidade, no transporte de potência ativa. O cenário ideal na conjuntura do transporte de energia através de uma linha de transmissão ocorre quando é transportada pela linha um valor de potência ativa correspondente ao valor de sua Potência Natural (REZENDE et al., 2013).

A Potência Natural da linha, ou SIL (do inglês *Surge Impedance Loading*), seria a potência em *MW* onde a linha não consome, nem gera potência reativa (SAADAT, 1999). O cálculo da SIL da linha pode ser realizado através da equação (4).

$$SIL = \frac{V^2}{Z_c} [MW] \quad (4)$$

Onde:

- V^2 – tensão trifásica da linha;
- Z_c – impedância característica da linha.

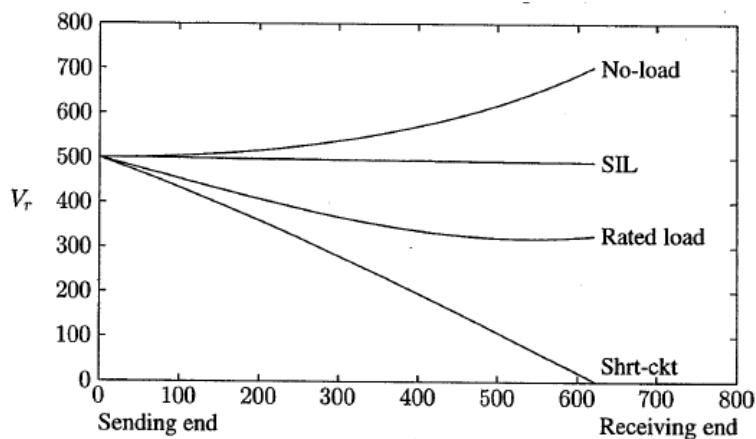
A SIL estabelece uma correlação entre a tensão e a impedância da linha. Na Figura 1 pode ser observado o perfil de tensão de uma linha específica, relacionado à sua impedância característica.

Quando a potência na linha está abaixo da SIL, a linha está gerando mais reativos do que o necessário para o transporte de potência ativa. Este reativo adicional gerado pela linha aumenta com o nível de tensão e o comprimento da linha. Tal característica pode ser observada pela curva (“*No Load*”) para o caso de um sistema operando com baixa carga ou cargas inferiores a SIL, onde a tensão no extremo receptor da linha (“*Receiving end*”) torna-se maior conforme o extremo emissor (“*Sending end*”) se aproxima (REZENDE et al., 2013; SAADAT, 1999).

Para uma carga superior a SIL, como pode ser observada na curva (“*Rated load*”), a linha apresentará a necessidade de receber reativo, caso esta condição não seja satisfeita, a tensão no extremo receptor torna-se menor que no emissor (SAADAT, 1999).

A curva *Shrt-ckt* configura o caso de um curto-circuito na linha, caracterizado pelo aumento da tensão no extremo receptor, enquanto a tensão no extremo emissor tende a zero.

Figura 1- Perfil de Tensão.



Fonte: (SAADAT (1999)).

Sistemas carregados, com alta carga, resultam em uma queda da magnitude da tensão ao longo do comprimento da LT. A compensação *shunt* é utilizada nestas situações para compensar os efeitos da potência reativa na linha mantendo a tensão no extremo receptor em níveis aceitáveis (SAADAT, 1999).

3 METODOLOGIA

Os estudos de fluxo de potência, análise de contingência e compensação de reativos dispostos neste trabalho foram realizados no sistema-teste STB-107CA. Este sistema-teste foi desenvolvido por Waschington Fernandes Alves com dados, topologia de rede, parâmetros elétricos e condições operacionais extraídos do próprio SIN visando a elaboração de análises e estudos em regime estático do Sistema Elétrico com maior proximidade com a realidade nacional.

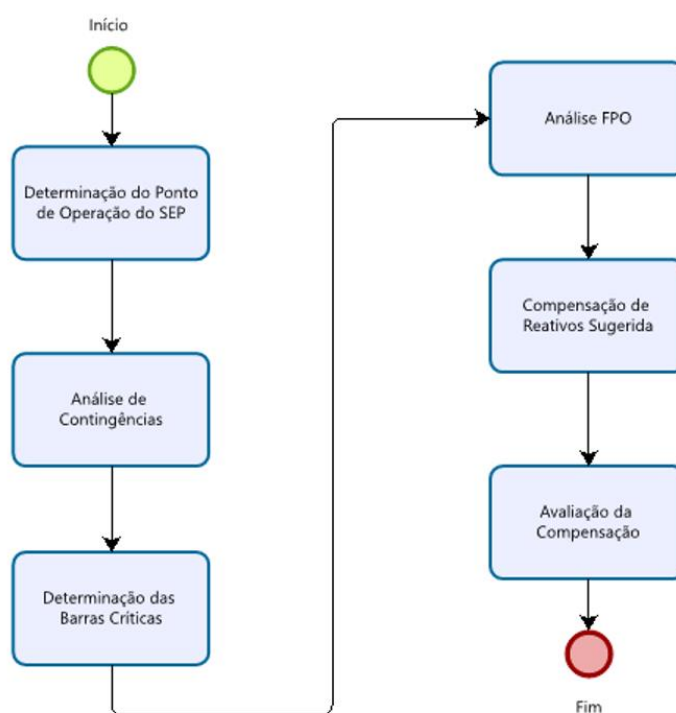
Os estudos concernentes ao sistema-teste dispostos neste trabalho seguem as *Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos do Procedimento de Rede*, da ONS para estudos estáticos do SEP (ONS, 2016).

Para os estudos relacionados à compensação de reativo foi utilizada a análise do FPO, a fim de determinar as barras do sistema melhores indicadas a receber a compensação. Para execução desses estudos foi utilizado o programa *FLUPOT*. Desenvolvido pela CEPEL o programa é amplamente utilizado em estudos relacionados à determinação dos limites de intercâmbio entre subsistemas do SIN, planejamento de compensação reativa, planejamento da operação e expansão de sistemas elétricos, bem como para análise de problemas de otimização de funções objetivas correlatas ao SEP.

O *software* utilizado para execução destas etapas foi o ANAREDE, o qual permite diversas análises do SEP em regime permanente, incluindo as análises de fluxo de potência, contingência e de forma paralela a análise do fluxo de potência ótimo desenvolvidos neste trabalho.

As etapas e procedimentos realizados para os devidos estudos são apresentados pelo fluxograma da Figura 2. A metodologia para estudo iniciou-se com a determinação do ponto de operação do sistema teste, sendo realizada na sequência as análises de contingência e a determinação das barras críticas. Sendo realizado ao fim os estudos correlatos a compensação de reativos.

Figura 2 – Fluxograma da Metodologia Proposta



Fonte: Autoria Própria.

3.1 Determinação do Ponto Operativo do Sistema

Inicialmente efetuou-se a análise do fluxo de potência do sistema-teste proposto. O objetivo principal desta etapa foi fornecer dados e parâmetros para análises posteriores do comportamento do sistema quando simulado o contingenciamento de determinadas linhas de transmissão. Neste sentido, por meio da análise do fluxo de potência pelo Método de Newton-Raphson definiu-se o ponto de operação do sistema, assim como os níveis de carregamento das linhas de transmissão. Os transformadores foram fixados para monitoramento de possíveis violações quanto às estas margens de segurança estabelecidas.

3.2 Análise de Contingência com Critério $N - 1_{\text{linhas}}$

A função *Análise de Contingência Programada* disponível no software ANAREDE foi utilizada para realização das análises nesta etapa. Neste processo, com o propósito de detectar condições severas de operação, simulou-se o

contingenciamento de cada uma das LT's que compõem cada área do sistema, com exceção de linhas que resultem no ilhamento de determinadas barras do sistema-teste.

O *software* ANAREDE disponibiliza uma série de controles para o monitoramento do sistema teste ao longo da simulação dos casos de contingência. Três controle foram utilizados: o Controle do Limite de Tensão nas barras; o Controle de Potência Reativa nas barras de geração e o Limite de Intercâmbio dos Fluxos de Potência nos circuitos.

A cada contingência, o programa encontra uma nova solução para o fluxo de potência, utilizando o Método de Newton-Raphson para sua resolução, a monitoração do sistema é realizada considerando os limites operacionais previamente definidos. Dentro deste cenário, o contingenciamento de determinadas linhas de transmissão resultou em pontos de operação de difícil convergência ou mesmo a sua não convergência. Segundo Alves (2007) esta situação ocorre devido à transmissão de potência e o suporte de tensão das linhas estarem operando no seu limite máximo.

Para determinar uma solução numérica em casos de não convergência, foi seguido o procedimento proposto em Alves (2007) que sugere uma série de medidas a serem seguidas para resolução do problema, sendo elas:

- Desligar todas as opções de controle para execução do programa de análise de contingência;
- Representar a carga como 75% da potência ativa e 100% da potência reativa, variando com o quadrado da tensão;
- Estabelecer como referência as barras que interligam a linha de transmissão em contingenciamento.

O *Programa de Análise de Contingência* disponibiliza um relatório das violações detectadas no tocante aos limites estabelecidos para monitoração do sistema em cada caso de contingenciamento, ordenadas segundo um índice de severidade que corresponde ao desvio quadrático médio em relação aos limites preestabelecidos para cada grandeza que está sendo monitorada.

3.3 Determinação das Barras Críticas

Nesta etapa foi definida as barras do sistema para possível compensação de reativos. O critério de avaliação de severidade, dos casos analisados, disponibilizado pelo *software* ANAREDE, foi empregue para a avaliação das barras com maior criticidade que integram o sistema-teste dada a ocorrência de contingências.

O *software* disponibiliza três opções para o monitoramento de desempenho:

1. Monitoramento do Fluxo de Potência;
2. Monitoramento de Tensão;
3. Monitoramento de Geração de Potência Reativa.

O nível de severidade das violações é obtido por meio da comparação dos valores pré contingência de fluxo, tensão e potência reativa gerada, com os valores de pós-contingência, sendo verificado então, se os limites de operação do sistema foram ultrapassados.

Cabe destacar que serão utilizados para análise, em consonância com o *software*, para os casos de violação de tensão, os limites de tensão para condições operativas de emergência definidos pela ONS, dispostos na Tabela 1.

Tabela 1 – Tensões entre fases admissíveis à 60Hz

Tensão Nominal de Operação	Condição Operativa Normal		Condição Operativa de Emergência	
	(KV)	(pu)	(KV)	(pu)
<230	*	0.95 a 1.05	*	0.90 a 1.05
230	218 a 242	0.95 a 1.05	207 a 242	0.90 a 1.05
345	328 a 362	0.95 a 1.05	311 a 362	0.90 a 1.05
440	418 a 460	0.95 a 1.046	396 a 460	0.90 a 1.046
500	500 a 550	1.00 a 1.10	475 a 550	0.95 a 1.10
525	500 a 550	0.95 a 1.05	475 a 550	0.90 a 1.05
765	690 a 800	0.90 a 1.046	690 a 800	0.90 a 1.046

Fonte: (ONS, 2016).

3.4 Compensação de Reativos Sugerida

Com o objetivo de eliminar ou minimizar as possíveis violações dos parâmetros operacionais do sistema decorrentes do contingenciamento das LT's, a análise da compensação de reativos foi realizada nesta etapa.

A escolha do local, do tipo de compensação e do montante a ser alocado é de suma importância para a análise, visto que uma compensação mal planejada pode resultar em violações e impactos mais severos para o sistema.

Para tal avaliação utilizou-se o programa computacional FLUPOT, em consonância com o *software* ANAREDE, para indicação da compensação a ser realizada no sistema a fim de alcançar a solução mais assertiva para o caso contingenciado.

Para a análise da compensação em casos em que o contingenciamento resultar em violações do fluxo de potência entre as linhas de transmissão, a função objetivo utilizada para análise foi a Máxima Transferência de Potência (MXTR). Já nos casos em que a análise de contingência resultar em violações dos parâmetros de tensão nas barras, a função objetivo utilizada foi a de Controle de Tensão (CLTN).

Considerando o cenário quando o caso contingenciado resulte em violações de ambos os parâmetros, fluxo e tensão, utilizou-se a função objetivo MXTR para a realização da compensação.

3.5 Avaliação da Compensação

Ao final de cada caso selecionado para aplicação da metodologia, foi realizada a avaliação do sistema-teste após a compensação de reativos nos casos críticos verificados durante a análise de contingência. Tornou-se possível, então, avaliar a influência da compensação realizada em cada caso estudado e se esta foi efetiva para uma minimização significativa da contingência ou mesmo sua eliminação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentadas as análises realizadas no sistema teste STB107CA. Inicialmente foi determinado o ponto operativo do sistema, seguindo para a análise de contingência. Por fim analisou-se a compensação de reativos em cinco casos pós contingência, dois que resultaram em violações do fluxo de potência, dois com violações de tensão em determinadas barras do sistema e um caso na qual a contingência resultou tanto na violação do fluxo de potência, como de tensão em barras do sistema.

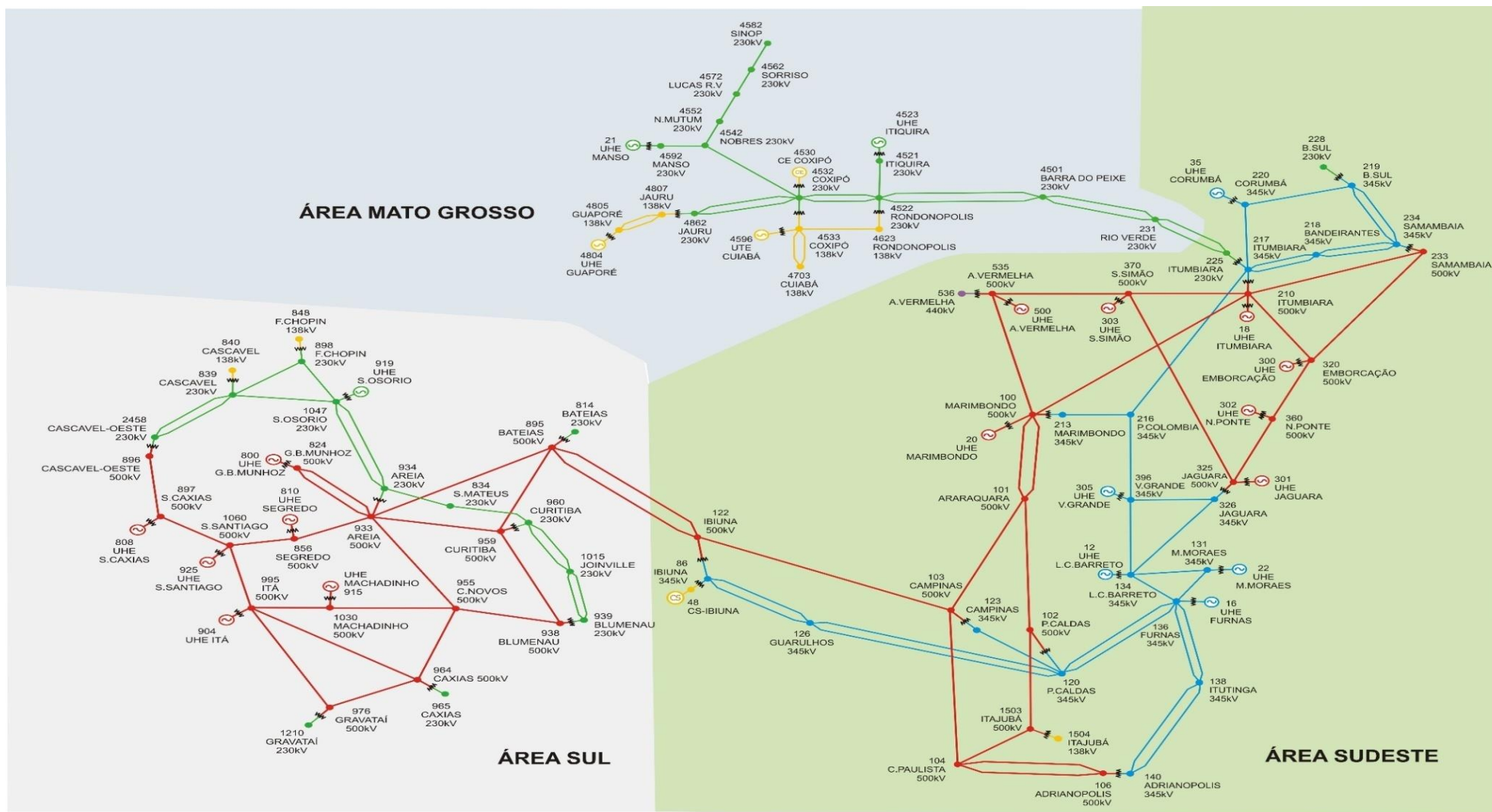
4.1 Análise de Contingência com Critério $N - 1_{linhas}$ do sistema-teste STB-107CA

A metodologia empregue neste trabalho baseia-se na obtenção do ponto de operação do sistema-teste e na delimitação dos seus parâmetros operacionais para monitoramento. O ponto de operação foi definido por meio da análise do fluxo de potência por meio-do Método de Newton-Raphson.

O sistema-teste 107STBCA, apresentado na Figura 3, é subdividido em três áreas: Sul, Sudeste e Mato Grosso, possuindo capacidade total de geração de 22.080 MW e carga total de 12.679 MW. Cabe destacar que o subsistema Sudeste concentra 56% da capacidade de geração, tornando o intercâmbio de energia entre os subsistemas de fundamental importância.

Após análise do diagrama unifilar do sistema, identificou-se que a contingência de algumas LT's pertencentes a Área 3 (Mato Grosso) resultariam em ilhamento direto de uma ou mais barras do sistema. Estas LT's foram segregadas da análise de contingência e compensação de reativos. Foram simulados, então, 98 casos de contingência, os quais encontram-se dispostos na Tabela 2.

Figura 3 – Diagrama unifilar do sistema teste brasileiro de 107 barras (STB-107CA)



Fonte: Alves (2007).

Tabela 2 – Casos de Contingência Simulados

(continua)

Caso	De	Para	Nome	Tensão (KV)	Circ.	Área
1	100	101	Marimbondo-Araraquara	500	1	1
2	100	101	Marimbondo-Araraquara	500	2	1
3	100	210	Marimbondo-Araraquara	500	1	1
4	100	535	Marimbondo-A.Vermelha	500	1	1
5	101	102	Araraquara-P.Caldas	500	1	1
6	101	103	Araraquara-Campinas	500	1	1
7	102	1503	P.Caldas-Itajubá	500	1	1
8	103	104	Campinas-C.Paulista	500	1	1
9	104	1503	C.Paulista-Itajubá	500	1	1
10	103	122	Campinas-Ibiúna	500	1	1
11	210	370	Itumbiara-São Simão	500	1	1
12	210	233	Itumbiara-Samambaia	500	1	1
13	233	320	Samambaia- Emborcação	500	1	1
14	210	320	Itumbiara-Emborcação	500	1	1
15	320	360	Emborcação-N. Ponte	500	1	1
16	325	360	Jaguara-N.Ponte	500	1	1
17	325	370	Jaguara-São Simão	500	1	1
18	370	535	São Simão-Água Vermelha	500	1	1
19	824	933	Gov. Bento Munhoz-Areia	500	1	2
20	824	933	Gov. Bento Munhoz-Areia	500	2	2
21	834	934	São Mateus-Areia	230	1	2
22	839	898	Cascavel-F.Chopin	230	1	2
23	839	1047	Cascavel-S. Osório	230	1	2
24	839	2458	Cascavel-Cascavel Oeste	230	1	2
25	839	2458	Cascavel-Cascavel Oeste	230	2	2
26	856	933	Segredo-Areia	500	1	2
27	856	1060	Segredo-S. Santiago	500	1	2
28	122	895	Ibiúna-Bateias	500	1	1→2
29	122	895	Ibiúna-Bateias	500	2	1→2
30	896	897	Cascavel Oeste-S. Caxias	500	1	2
31	898	1047	F. Chopin-S. Osório	230	1	2
32	933	895	Areia-Bateias	500	1	2
33	933	955	Areia-Campos Novos	500	1	2
34	933	959	Areia-Curitiba	500	1	2
35	934	1047	Areia-S. Osório	230	1	2
36	934	1047	Areia-S. Osório	230	2	2
37	938	955	Blumenau-Campos Novos	500	1	2
38	938	959	Blumenau-Curitiba	500	1	2
39	955	964	Campos Novos-Caxias	500	1	2
40	959	895	Curitiba-Bateias	500	1	2
41	964	976	Caxias-Gravitaí	500	1	2
42	976	995	Gravitaí-Itá	500	1	2
43	995	964	Itá-Caxias	500	1	2
44	995	1030	Itá-Machadinho	500	1	2

Tabela 2 – Casos de Contingência Simulados**(continuação)**

Caso	De	Para	Nome	Tensão (KV)	Circ.	Área
45	995	1060	Itá-S. Santiago	500	1	2
46	1030	955	Machadinho-Campos Novos	500	1	2
47	1060	897	S. Santiago-S. Caxias	500	1	2
48	939	1015	Blumenau-Joinville	230	1	2
49	939	1015	Blumenau-Joinville	230	2	2
50	1015	960	Joinville-Curitiba	230	1	2
51	1015	960	Joinville-Curitiba	230	2	2
52	960	834	Curitiba-São Mateus	230	1	2
53	126	86	Guarulhos-Ibiúna	345	1	1
54	126	86	Guarulhos-Ibiúna	345	2	1
55	126	120	Guarulhos-P. Caldas	345	1	1
56	126	120	Guarulhos-P. Caldas	345	2	1
57	134	131	L. C. Barreto-M. Moraes	345	1	1
58	134	396	L. C. Barreto-V. Grande	345	1	1
59	136	120	Furnas-P. Caldas	345	1	1
60	136	120	Furnas-P. Caldas	345	2	1
61	136	131	Furnas-M. Moraes	345	1	1
62	136	134	Furnas-L. C. Barreto	345	1	1
63	136	138	Furnas-Itutinga	345	1	1
64	136	138	Furnas-Itutinga	345	2	1
65	140	138	Adrianópolis-Itutinga	345	1	1
66	140	138	Adrianópolis-Itutinga	345	2	1
67	213	216	Marimbondo-P. Colômbia	345	1	1
68	216	396	P. Colômbia-V. Grande	345	1	1
69	217	216	Itumbiara-P. Colômbia	345	1	1
70	217	218	Itumbiara-Bandeirantes	345	1	1
71	217	218	Itumbiara-Bandeirantes	345	2	1
72	218	234	Bandeirantes-Samambaia	345	1	1
73	218	234	Bandeirantes-Samambaia	345	2	1
74	219	234	Brasília Sul-Samambaia	345	1	1
75	219	234	Brasília Sul-Samambais	345	1	1
76	220	217	Corumbá-Itumbiara	345	1	1
77	220	219	Corumbá-Brasília Sul	345	1	1
78	225	231	Itumbiara-Rio Verde	230	1	1
79	225	231	Itumbiara-Rio Verde	230	2	1
80	231	4501	Rio Verde-Barra do Peixe	230	1	1→3
81	231	4501	Rio Verde-Barra do Peixe	230	2	1→3
82	326	134	Jaguara-L. C. Barreto	345	1	1
83	326	396	Jaguara-V. Grande	345	1	1
84	106	104	Adrianópolis-C. Paulista	500	1	1
85	106	104	Adrianópolis-C. Paulista	500	2	1
86	123	120	Campinas-P. Caldas	345	1	1
87	4501	4522	Barra do Peixe-Rondonópolis	230	1	3
88	4501	4522	Barra do Peixe-Rondonópolis	230	2	3

Tabela 2 – Casos de Contingência Simulados

							(conclusão)
Caso	De	Para	Nome	Tensão (KV)	Circ.	Área	
89	4522	4532	Rondonópolis-Coxipó	230	1	3	
90	4522	4532	Rondonópolis-Coxipó	230	2	3	
91	4592	4542	Manso-Nobres	230	1	3	
92	4623	4533	Rondonópolis-Coxipó	138	1	3	
93	4703	4533	Cuiabá-Coxipó	138	1	3	
94	4703	4533	Cuiabá-Coxipó	138	2	3	
95	4805	4807	Guaporé-Jauru	138	1	3	
96	4805	4807	Guaporé-Jauru	138	2	3	
97	4862	4532	Jauru-Coxipó	230	1	3	
98	4862	4532	Jauru-Coxipó	230	2	3	

Fonte: Autoria Própria.

A cada caso simulado, a função *Análise de Contingência Programada*, disponibilizada pelo *software* ANAREDE, determinou uma nova solução para o fluxo de potência por meio do Método de Newton-Raphson, considerando a influência que a contingência apresentava nos parâmetros operacionais do SEP.

Cabe salientar que nesta etapa foram considerados, para análise, os níveis de tensão nas barras em condições operativas normais e em condições de emergência estabelecidos pela ONS, conforme apresentado na Tabela 1.

Ao final das simulações, três cenários distintos iniciais foram obtidos e são apresentados na Tabela 3. Dos 98 casos analisados, não foi possível obter a convergência inicial do fluxo de potência em 16 cenários, 66 casos contingenciados não apresentaram violações nos parâmetros de fluxo e de tensão e em 14 casos ocorreram violações.

Tabela 3 – Simulação Casos de Contingência

Não Convergem	Sem Violações	Com Violações		
		Tensão	Fluxo	Fluxo e Tensão
16	66	4	9	1

Fonte: Autoria Própria.

No que concerne aos casos em que a convergência do fluxo de potência do sistema não foi possível, foi utilizado os passos descritos na metodologia deste

trabalho para tentativa de resolução do problema, propostos por Alves (2007). Os casos que apresentaram não convergência encontram-se dispostos na Tabela 4.

Tabela 4 – Casos de Não Convergência do Fluxo de Potência Após Contingência

Caso	De	Para	Nome	Tensão (KV)	Circ.	Área
7	102	1503	P.Caldas-Itajubá	500	1	1
8	103	104	Campinas-C.Paulista	500	1	1
26	856	933	Segredo-Areia	500	1	2
30	896	897	Cascavel Oeste-S. Caxias	500	1	2
32	933	895	Areia-Bateias	500	1	2
34	933	959	Areia-Curitiba	500	1	2
37	938	955	Blumenau-Campos Novos	500	1	2
39	955	964	Campos Novos-Caixias	500	1	2
41	964	976	Caxias-Gravitaí	500	1	2
42	976	995	Gravitaí-Itá	500	1	2
43	995	964	Itá-Caxias	500	1	2
47	1060	897	S. Santiago-S. Caxias	500	1	2
79	225	231	Itumbiara-Rio Verde	230	2	1
81	231	4501	Rio Verde-Barra do Peixe	230	2	1→3
88	4501	4522	Barra do Peixe-Rondonópolis	230	2	3
91	4592	4542	Manso-Nobres	230	1	3

Fonte: Autoria Própria.

É possível observar que o maior número de casos de não convergência pertencem à Área 2. Isto se justifica, pois, a Área 2 do sistema-teste utilizado para estudo é a região que apresenta maior intercâmbio de potência e muitas linhas de transmissão encontram-se no limite de sua capacidade.

A primeira tentativa de solução e obtenção da convergência dos casos listados na Tabela 4, foi o desligamento das opções de controle do sistema, tais como: os limites de geração reativa, os limites de tensão e tensão em barra remota. Neste ponto cabe destacar que para os casos estudados que apresentaram a não convergência, este primeiro passo não se mostrou suficiente para convergência do fluxo de potência, assim como o segundo passo utilizado como tentativa, o qual consistiu em reduzir os níveis de carregamento da linha de transmissão,

representando a carga como 75% da potência ativa, permanecendo inalterada a potência reativa.

O terceiro e último passo empregue para tentativa de convergência do fluxo de potência, foi estabelecer como referência as barras que interligam a linha de transmissão do caso contingenciado. Ao definir as barras que interligam a LT contingenciada como referência, é estabelecida uma boa condição para a magnitude de tensão e ângulo de tensão das mesmas, possibilitando a obtenção da solução para o fluxo de potência do sistema de forma mais simplificada. Esta condição relaciona-se ao fato da magnitude da tensão e o ângulo da tensão na barra de referência não se modificarem durante a análise do fluxo de potência.

Ao estabelecer como referência as barras que interligam a linha de transmissão do caso contingenciado, foi alcançada convergência em 11 casos, como indicado na Tabela 5, sendo estes divididos em casos com violação da tensão ou violação do fluxo de potência, ou ainda casos em que não houve violações após a contingência.

Tabela 5 – Barras de Referência em Casos de Não Convergência

	Caso	De	Para	Nome	Tensão (KV)	Circ.	Área
Sem Violações	7	102	1503	P.Caldas-Itajubá	500	1	1
	79	225	231	Itumbiara-Rio Verde	230	2	1
	81	231	4501	Rio Verde-Barra do Peixe	230	2	1→3
	88	4501	4522	Barra do Peixe-Rondonópolis	230	2	3
Com Violações	8	103	104	Campinas-C.Paulista	500	1	1
	26	856	933	Segredo-Areia	500	1	2
	32	933	895	Areia-Bateias	500	1	2
	34	933	959	Areia-Curitiba	500	1	2
	39	955	964	Campos Novos-Caixas	500	1	2
	43	995	964	Itá-Caixas	500	1	2
	47	1060	897	S. Santiago-S. Caixias	500	1	2

Fonte: Autoria Própria.

A solução do fluxo de potência do sistema indica seu comportamento frente à contingência analisada, sendo seus parâmetros fortemente influenciados ao estabelecer como referência as barras que interligam a LT do caso contingenciado.

A solução forçada do fluxo de potência do sistema, resultou em níveis elevados de violação de fluxo e de tensão, como exemplo pode ser visualizado na Tabela 6, o relatório de monitoração de tensão da contingência do Caso 43.

Tabela 6 – Caso 43: Relatório de Monitoração da Tensão.

Barra	Nome	Tensão Mínima Emergência	Tensão Monitorada	Tensão Máxima Emergência	Violação	Severidade
964	Caxias	0.9	0.871	1.050	-0.029	483.0
976	Gravatai	0.9	0.842	1.050	-0.058	
965	Caxias	0.9	0.84	1.050	-0.060	
1210	Gravatai	0.9	0.826	1.050	-0.074	

Fonte: Autoria Própria.

A solução forçada do fluxo de potência dos casos em que não foi possível alcançar a convergência inicial, é pertinente quando considerado o estudo de contingência, sendo as informações dos parâmetros do sistema após a retirada de uma LT relevantes para entendimento e análise dos casos propostos. No entanto, para o estudo de compensação de reativos, não se torna assertivo pelas simplificações realizadas para obtenção da convergência. Foi utilizado, então, para estudo de compensação somente os casos em que a convergência inicial foi obtida.

Analisando os casos de contingência nos quais a convergência inicial foi alcançada, destes, 9 apresentaram como consequência da contingência violações do fluxo de potência, como pode ser observado na Tabela 7. O Caso 13, disposto na Tabela 7 e 8 refere-se ao único caso no qual houve violações tanto do fluxo de potência, como da tensão.

Tabela 7 – Casos de Contingência Com Violação de Fluxo.

(continua)

Caso	Linha	Circ.	Potência		Violação (MVA)	Carregamento (%)	Severidade
			Linha (MW)	Fluxos (Mvar)			
12	217→210	1	-638.0	-35.1	626.6	66.6	111.89
	217→210	2	-638.0	-35.1	626.6	66.6	111.89

Tabela 7 – Casos de Contingência Com Violação de Fluxo.**(conclusão)**

Caso	Linha	Circ.	Potência Linha (MW)	Fluxos (Mvar)	Potência (MVA/V)	Violação (MVA)	Carregamento (%)	Severidade
13	210→217	1	642.0	108.4	635.5	75.5	113.48	2.6
	210→217	2	642.0	108.4	635.5	75.5	113.48	
22	1047→839	1	192.4	5.7	189.6	0.6	100.30	1.0
31	1047→839	1	252.4	7.5	248.0	59.0	131.2	1.7
45	856→933	1	2863.0	217.8	2877.8	604.8	126.61	1.6
46	856→933	2	2377.9	16.6	2327.8	54.8	102.41	1.0
78	231→225	2	309.8	48.3	329.6	132.6	167.29	2.8
80	231→4501	2	221.8	-11.7	236.1	39.1	119.85	2.5
46	231→255	2	-186.2	-19.7	199.1	2.1	101.05	1.0
93	4703→4533	2	-182.1	-29.8	186.7	86.7	186.74	3.5
94	4703→4533	1	-182.1	-29.8	186.7	86.7	186.74	3.5

Fonte: Autoria Própria.

Como anteriormente já citado, a não convergência do fluxo de potência após o contingenciamento de determinadas LT's advém de a capacidade de transmissão de potência destas linhas estarem muito próximas do seu limite máximo. Somando a este cenário está o limite de tensão máximo ao qual as barras que interligam estas linhas de transmissão suportam. Na Tabela 8 estão apresentados os casos de contingência que resultaram em violações de tensão.

Tabela 8 – Casos de Contingência Com Violação de Tensão.

Caso	Circuito	Barra	Nome	Tensão Mín. Emergência	Tensão Monitorada	Tensão Máx. Emergência	Violação	Severidade
		1504	Itajuba	0.95	0.942	1,100	-0.008	
5	1	140	Adriano	0.95	0.939	1,100	-0.011	1.8
		1504	Itajuba	0.95	0.946	1,100	-0.004	
6	1	140	Adriano	0.95	0.945	1,100	-0.005	0.4
		104	C. Paulista	0.95	0.888	1,100	-0.062	
9	1	106	Adriano	0.95	0.873	1,100	-0.077	234.2
		140	Adriano	0.9	0.843	1,050	-0.057	
13	1	233	Samambaia	0.95	0.943	1,100	-0.007	0.5
28	1	959	Curitiba	0.95	0.949	1,100	-0.001	0.0
29	2	959	Curitiba	0.95	0.949	1,100	-0.001	0.0
40	1	959	Curitiba	0.95	0.944	1,100	-0.006	0.4

Fonte: Autoria Própria.

Sendo o controle da tensão em um SEP uma das problemáticas mais estudadas e indispensáveis para operação do sistema, é observável nos resultados apresentados na Tabela 8, que não apenas a magnitude das tensões nas barras que interligam uma LT contingenciada apresenta violações dos limites de operacionais, mas também barras próximas as mesmas.

Visando tanto o aumento da capacidade de transmissão e intercâmbio de potência entre as áreas do subsistema estudado, bem como a manutenção dos parâmetros de tensão, a avaliação de compensação de reativos em locais próximos às barras e ou linhas que apresentaram violações tornam-se um recurso a ser avaliado para manutenção e operação do sistema de forma segura.

4.2 Análise da Compensação de Reativos

A análise da compensação de reativos nas linhas de transmissão que apresentaram violações nos seus parâmetros operacionais, após estudo de contingenciamento, é realizada nesta etapa com objetivo de eliminar ou minimizar o impacto que estas contingências apresentam para o sistema.

Dentro deste subcapítulo encontram-se, de forma conjunta, a avaliação da compensação. Tal estrutura foi utilizada visando sintetizar os resultados obtidos, melhorando deste modo a compreensão do trabalho.

4.2.1 Casos de Contingência Com Violação do Fluxo de Potência

Inicialmente para análise da compensação, foi realizada a estruturação do arquivo de otimização a ser utilizada no programa FLUPOT.

A função objetivo utilizada foi a de MXTR, tal escolha foi motivada pela percepção de que para melhor aproveitamento das LT's e assim maior transferência do fluxo de potência, entre as linhas vizinhas a linha contingenciada, é necessário realizar a otimização do sistema pós contingência visando estabelecer o limite máximo ao qual as mesmas podem ser submetidas, mantendo-se a estabilidade do sistema.

Estabelecendo a função MXTR como função objetivo, ao realizar a otimização do sistema, o programa já indicará se a compensação reativa é necessária, se sim, a barra e o montante a ser alocado. Porém, a função objetivo considera as áreas de interesse para execução da otimização (DARI), sendo considerada então, a compensação em todas as barras que integram estas áreas.

A função ASHN (Custo de Instalação de *Shunt* Reativo), foi utilizada para restringir a compensação de reativos apenas à área onde a contingência e as violações decorrentes da mesma ocorreram. Tal função objetivo permite estabelecer dados das barras a serem consideradas para a instalação da compensação *shunt*. Como não está sendo considerado para análise proposta neste trabalho o custo da compensação, mas sim o melhor cenário para compensação, o mesmo foi definido como zero.

Um ponto completo, foram estabelecidas como candidatas, à alocação de compensação *shunt*, apenas as barras circunvizinhas à linha contingenciada ou que apresentaram violações. Esta escolha foi realizada visando estabelecer um menor impacto das contingências analisadas e sucessivamente das compensações realizadas no sistema como um todo. Ademais, para que na ocorrência de uma contingência, não se necessite realizar uma série de compensações em diversas barras do sistema, para sua mitigação ou minimização, restringindo-se, então, a compensação apenas a proximidade das barras afetadas pela contingência.

Foram escolhidos dois casos para apresentação detalhada do estudo realizado, sendo eles os que apresentaram maior índice de severidade indicado pela análise do *software* ANAREDE, o Caso 78 e o Caso 94. O código base utilizado para simulação dos casos de contingência com violação de fluxo de potência, no FLUPOT, encontra-se no Anexo A.

4.2.1.1 Caso 78

A contingência analisada no Caso 78 foi entre as LT's 225-Itumbiara e a 231-Rio Verde, ambas pertencentes à Área 1 e com tensão de 230KV. A conexão entre estas duas barras ocorre através de duas LT's, circuito 1 e 2, sendo simulado neste caso a retirada do circuito 1.

Como apresentado no subcapítulo 4.2, após a simulação da contingência, houve violações do fluxo de potência entre a linha de transmissão de circuito 2, que interliga a barra 225-Itumbiara (230KV) com a barra 231-Rio Verde (230KV), como apresentado na Tabela 6, na qual a mesma passou a operar 67,29% acima de sua capacidade de transmissão de potência.

Neste cenário foram consideradas as barras 225, 231 e as barras circunvizinhas a estas, para alocação de potência reativa. Para utilização da função objetivo ASHN, é necessária a utilização do código DCAQ. Este código permite realizar a indicação das barras candidatas, valores máximos e mínimos de compensação, custo para alocação e o tipo de compensação a ser realizada, como apresentada na Figura 4.

Neste caso optou-se por indicar as barras candidatas a receber compensação reativa. Porém caso o usuário queira considerar para a análise de

otimização todas as barras do sistema como candidatas à alocação de reativos, deve ser inserido no campo a ser designado o número da barra 0000.

Figura 4 – Caso 78: Barras Indicadas a Compensação Reativa.

```
.Dados necessários para função objetivo ASHN
.
(CQ) (Mn) (Mn)
DCAQ IMPR
(23456789012345678901234567890123456789012345
(Num)          (Qmxi (Qmxc          (Csti (CstiE
0225           100  100           0  0
0231           100  100           0  0
4501           100  100           0  0
0217           100  100           0  0
99999
```

Fonte: Autoria Própria.

Para execução da função objetivo MXTR, é necessário especificar as áreas para máxima transferência de potência ativa. Tal especificação é realizada por meio da função DTRF. Neste caso foi indicado como área de interesse para execução da otimização a Área 1 e 3, como pode ser visualizado na Figura 5. A indicação das áreas de interesse, DARI, é necessária para execução da função DTRF. Neste caso foram consideradas todas as áreas como de interesse para otimização.

Figura 5 – Caso 78: Função DFTR e DARI.

```
DTRF IMPR
(23456789012345678901234567890
(Ar (Ar Tot (Lmin.) (Lmax.)
3  1
99999

.Função necessário para DTRF - DARI - Area de interesse
.
DARI
(Ar
1
2
3
99999
```

Fonte: Autoria Própria.

Ao fim da otimização foi encontrado o cenário ótimo de maximização da transferência de potência entre as barras da Área 1, frente a ocorrência da contingência analisada. Sendo considerada a alocação de *shunt* reativos nas barras indicadas na Tabela 9. Tais valores foram inseridos no sistema para nova simulação

da contingência e assim verificar a influência da compensação nas violações encontradas.

Tabela 9 – Caso 78: Potência Reativa Alocada.

Barra	Mvar
217	-13.55
225	28.27
231	-8.50
4501	-10.32

Fonte: Autoria Própria.

Após a simulação da contingência definida para o caso, considerando a compensação sugerida por meio da otimização, a violação apresentada no sistema pré compensação foi mantida.

Os níveis destas violações podem ser observados na Tabela 10, na qual é apresentada uma comparação da violação decorrente da análise de contingência antes e após a compensação. Houve um decréscimo de 4,67% do sobrecarregamento da LT, porém o nível de carregamento da linha continua muito acima do limite para condição de emergência definido pelo sistema.

Tabela 10 – Caso 78: Análise de Contingência Antes e Após Compensação.

Linhas Com Violações	Circuito	Potência Linha (MW)	Fluxos (Mvar)	Potência (MVA/V)	Violação (MVA)	Carregamento (%)	Severidade
Antes		309.8	48.3	329.6	132.6	167.29	2.8
Após	225→231	320.2	-9.3	320.4	123.4	162.62	2.6

Fonte: Autoria Própria.

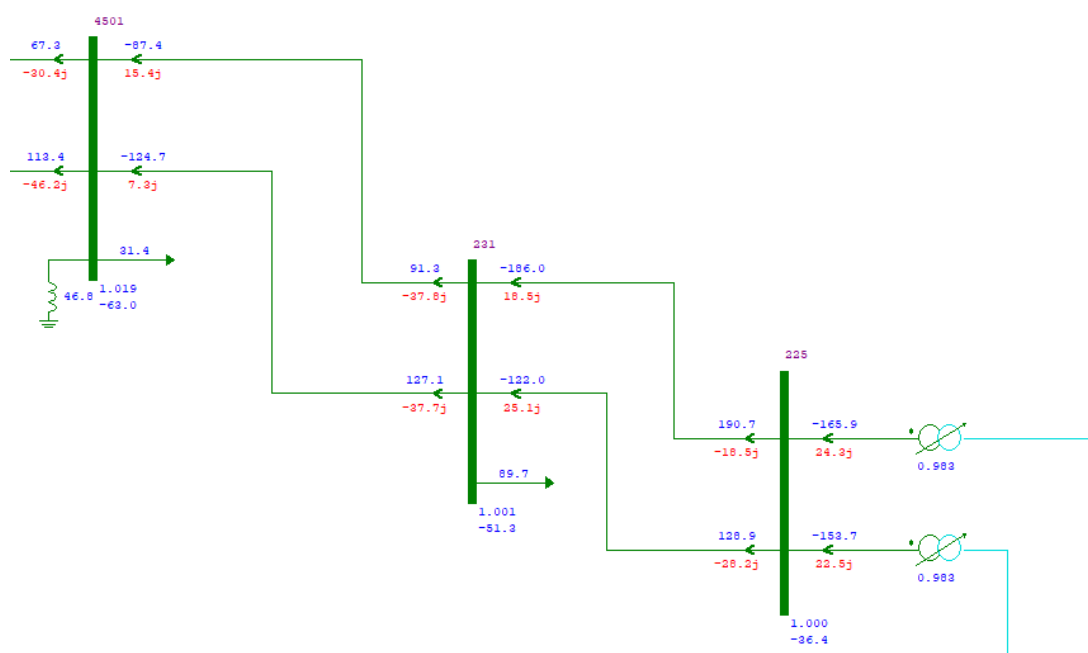
Avaliando a contingência do caso analisado, percebe-se a mesma ser bastante crítica para o sistema.

Tal criticidade é justificada quando analisados os pontos de conexões. A Área 3 possui 22 barras, sendo 4 delas barras PV com geração total de 470 MW e 18 do tipo PQ, com um total de 755,6 MW de carga instalada. Indicando assim, que grande parte da potência requerida para a Área 3 provem do intercâmbio de

potência com as demais regiões do sistema, sendo as barras estudadas neste caso o ponto de interligação direto.

A barra 225 é uma conexão direta da Área 1 do sistema com a Área 3, onde os circuitos 1 e 2, que interligam a barra 225 á 231, são os únicos pontos de transferência de potência entre estas regiões, como pode ser visualizado na Figura 6.

Figura 6 – LT's Barra 225-Itumbiara e 231- Rio Verde.



Fonte: Alves (2007).

Quando operando em condições normais, estas duas LT's possuem uma capacidade de 197 MVA cada. Ao retirar uma delas de operação, a linha vizinha entra em condição de emergência e seus limites de fluxo de potência ficam sobrecarregados.

Partindo destas considerações é possível conjecturar que a compensação de reativos não vá maximizar os limites de carregamento da linha de circuito 2 de forma a suprir toda a carga demandada da Área 3, porém deve aumentar seus limites.

Tal conjectura pode ser observada nos resultados da Tabela 9, onde após a adição da compensação *shunt* houve uma minimização das violações de fluxo de potência entre as barras 225 e 231, não sendo possível, entretanto, a sua eliminação.

4.2.1.2 Caso 93

O caso 93 possui contingência entre duas barras pertencentes a Área 3, Mato Grosso. A barra 4703-Cuiabá e barra 4533-Coxipó, ambas com tensão de 230KV. A conexão entre estas duas barras ocorre por meio de duas LT's, circuito 1 e 2.

Após a simulação da contingência houve violações do fluxo de potência, como apresentada na Tabela 6, no subcapítulo 4.2. A violação ocorreu entre a LT de circuito 2 que interliga as barras analisadas neste caso, onde foram extrapolados 86,7 MVA da sua capacidade de transmissão de potência.

Para alocação de potência reativa foram consideradas as barras 4703, 4533 e as barras circunvizinhas a estas, como apresentada na Figura 7.

Figura 7 – Caso 93: Barras Indicadas a Compensação Reativa.

```
.Dados necessários para função objetivo ASHN
.
(CQ) (Mn) (Mn)
□ DCAQ IMPR
(23456789012345678901234567890123456789012345
(Num) (Qmxi (Qmxc (Csti (CstiE
4703 100 100 0 0
4533 100 100 0 0
4623 100 100 0 0
4532 100 100 0 0
99999
```

Fonte: Autoria Própria.

Após a otimização do sistema foi considerada alocação de *shunt* reativo nas quatro barras indicadas, sendo possível visualizar o montante apontado na Tabela 11.

Tabela 11 – Caso 93: Potência Reativa Alocada.

Barra	Mvar
4532	-38.65
4533	-9.97
4623	-8.05
4703	24.98

Fonte: Autoria Própria.

A simulação da contingência definida para o caso foi realizada novamente, considerando a compensação sugerida por meio da otimização, sendo mantida a

violação do fluxo de potência na LT de circuito 2 que interliga as barras 4703 e 4533. Os níveis destas violações podem ser observados na Tabela 12.

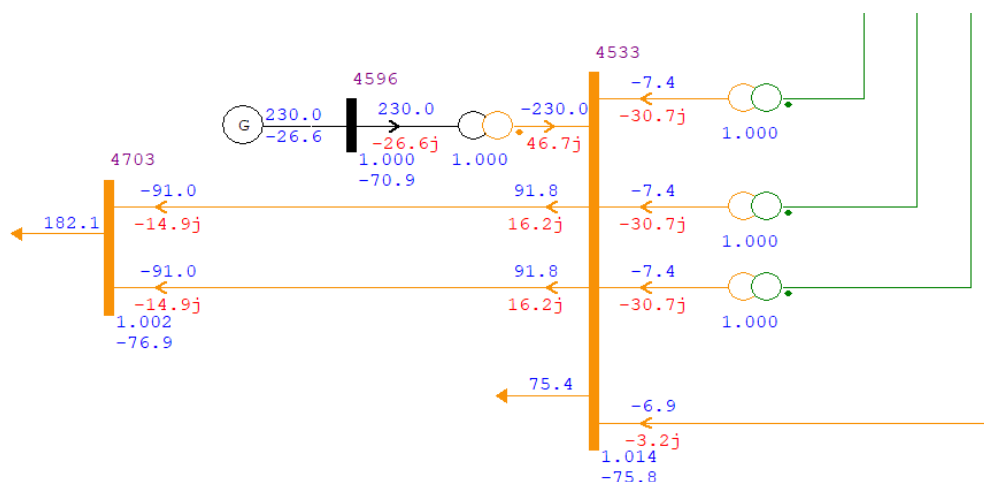
Tabela 12 – Caso 93: Análise de Contingência Antes e Após Compensação.

	Linhas Com Violações	Circuito	Potência Linha (MW)	Fluxos (Mvar)	Potência (MVA/V)	Violação (MVA)	Carregamento (%)	Severidade
Antes	4703→4533	2	-182.1	-29.8	186.7	86.7	186.74	3.5
Após			-182.1	-5.3	184.4	84.4	184.4	3.4

Fonte: Autoria Própria.

Analisando as barras que unem a LT contingenciada, verifica-se que a barra 4703 possui uma carga de 182.1 MW, sendo a mesma suprida somente através da conexão entre a LT's, de circuito 1 e 2, com a barra 4533. Percebe-se, então, que a interligação entre estas barras é vital para suprimento desta carga, como pode ser visualizado na Figura 8.

Figura 8 – LT's Barra 4703-Cuiabá e 4533-Caxipó.



Fonte: Alves (2007).

Avaliando agora a barra 4533, a mesma possui uma carga de 75,4 MW e é conectada a uma barra PV, com geração total de 230 MW, assim como a outras duas barras do sistema, possuindo assim fontes alternativas de intercâmbio de potência.

Em estado de operação normal cada LT que interliga as barras 4703 e 4533 possui uma capacidade de transmissão de 100 MVA, entretanto, após a contingência estudada, esta capacidade é extrapolada em 86,74%. Tais dados podem ser observados na Tabela 11. Da mesma forma pode ser observado que a carga pertencente à barra 4703 não consegue ser atendida após a contingência.

Ainda, analisando os resultados dispostos na Tabela 11, após a compensação de reativos houve um decréscimo do nível de sobrecarregamento do circuito 2 de 2,33%. Cabe destacar que sendo os níveis de carregamento de ambas as linhas, de circuito 1 e 2 que interligam as barras em questão, iguais, tanto para situações operativas normais e de emergência, não é possível que ao contingenciar uma delas a sobressalente passe a realizar todo intercâmbio de potência. A compensação realizada, neste caso, aumentou esta margem, porém não eliminou os efeitos da contingência.

4.2.2 Casos de Contingência com Violação do Fluxo de Potência e Tensão

Dos 98 casos de contingência simulados, o Caso 13 apresentou violações tanto do fluxo de potência como da tensão. Optou-se por realizar sua análise pelo fato de ser um caso muito específico, onde dois parâmetros do sistema estudado encontram-se com seus limites operacionais comprometidos.

Foi discutido na metodologia que duas funções objetivos diferentes seriam utilizadas para análise das violações de contingência, uma com foco em minimizar os impactos das violações de fluxo de potência, a função de máxima transferência de potência MXTR, assim como a função objetivo CLTN para os casos de violações de tensão nas barras.

A princípio foi utilizada a função objetivo MXTR em conjunto com a função objetivo ASHN, com a expectativa de haver um ganho de maior significância em relação as violações do fluxo de potência.

A LT contingenciada foi a que interliga as barras 233-Samambaia e 320-Emborcação, ambas de 500KV e pertencentes a Área 1. Cabe destacar que esta LT possui um ponto particular, ela é o único ponto de intercâmbio de potência entre estas barras, sua contingência resultando então, na perda de conexão e sobrecarregamento das barras vizinhas.

Ao fim da análise de contingência verifica-se que houve violações do fluxo de potência em duas LT's, que interligam barras vizinhas, como apresentado na Tabela 13.

Tabela 13 – Caso 13: Violações do Fluxo de Potência.

Linhas Com Violações	Circuito	Potência Linha (MW)	Fluxos (Mvar)	Potência (MVA/V)	Violação (MVA)	Carregamento (%)	Severidade
210→217	1	642.0	108.4	635.5	75.5	113.48	2.6
210→217	2	642.0	108.4	635.5	75.5	113.48	

Fonte: Autoria Própria.

A violação da tensão ocorreu na barra 233-Samambaia. A barra apresenta limite de tensão para condições de emergência de 0,95pu, após a contingência a tensão da barra caiu para 0,943 pu.

Foram consideradas para alocação de potência reativa, neste cenário, as barras 320, 233, 218, 217, 210 e as barras circunvizinhas a estas, como apresentadas na Figura 9.

Figura 9 – Caso 13: Barras Indicadas a Compensação Reativa.

```
.Dados necessários para função objetivo ASHN
.
(CQ) (Mn) (Mn)
□ DCAQ IMPR
(23456789012345678901234567890123456789012345
(Num) (Qmxi (Qmxc (Csti (CstiE
0233 100 100 0 0
0320 100 100 0 0
0210 100 100 0 0
0217 100 100 0 0
0218 100 100 0 0
0219 100 100 0 0
0234 100 100 0 0
0228 100 100 0 0
0360 100 100 0 0
99999
```

Fonte: Autoria Própria.

Após a otimização do sistema foi considerada alocação de *shunt* reativos em todas as barras indicadas, sendo possível visualizar o montante apontado na Tabela 14.

Tabela 14 – Caso 13: Potência Reativa Alocada.

Barra	Mvar
210	-13.55
217	28.27
218	25.12
219	42.16
228	31.6
233	42.13
234	43.8
320	-19.61
360	-23.42

Fonte: Autoria Própria.

Após a definição da compensação a ser alocada, foi realizada a simulação da contingência definida para o caso. Com a adição da compensação o limite de tensão na barra 233 voltou à faixa de magnitude definida para condições operativas de emergência, não sendo encontradas, da mesma forma, violações de tensão entre as demais barras do sistema.

Entretanto, no tocante às violações do fluxo de potência, a adição da compensação não alterou o comprometimento das duas LT's que interligam as barras 217 e 210. Os níveis valores destas violações podem ser observados na Tabela 15.

Tabela 15 – Caso 13: Análise de Contingência Antes e Após Compensação.

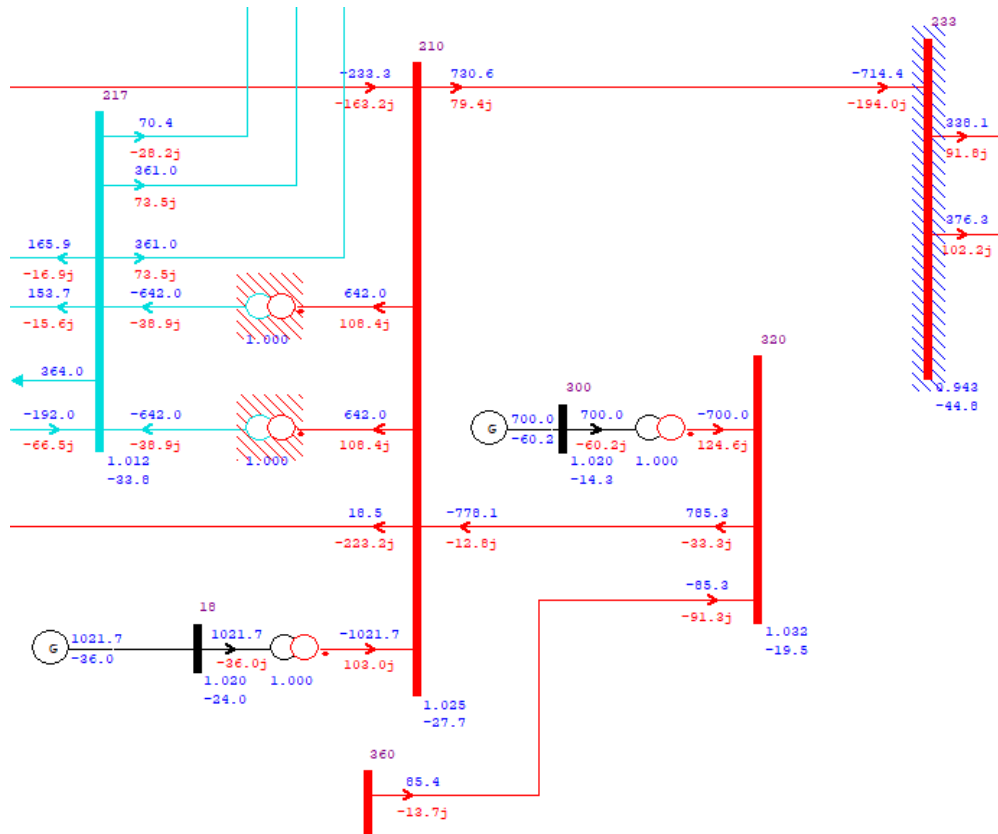
	Linhas Com Violações	Circuito	Potência Linha (MW)	Fluxos (Mvar)	Potência (MVA/V)	Violação (MVA)	Carregamento (%)	Severidade
Antes	218→217	1	642.0	108.4	635.5	75.5	113.48	2.6
	210→217	2	642.0	108.4	635.5	75.5	113.48	
Após	210→217	1	-638.5	12.7	619.8	59.8	110.68	2.5
	210→217	2	-638.5	12.7	619.8	59.8	110.68	

Fonte: Autoria Própria.

Após realização da compensação, os níveis de carregamento entre as LT's que interligam as barras 210 e 217 aumentaram, como indicado na Tabela 13,

porém as linhas não são aptas a transmitirem toda potência proveniente da barra 320, como como pode ser observado na Figura 10.

Figura 10 – LT's Barra 233-Samambaia e 320-Emborcação.



Fonte: Alves (2007).

Analisando as barras 233 e 320 que unem a LT contingenciada, destacam-se alguns pontos. A barra 320 é a única conexão de uma barra PV com geração total de 700 MW, sendo esta potência essencial para o intercâmbio de potência com as barras vizinhas. Ao ser retirada de operação a LT que interliga as barras 233 e 320, todo fluxo de potência proveniente da barra 360-N.Ponte, que flui através por meio das barras 320 e 233, passa a fluir para barra 217, sobrecarregando suas LT's.

Para a violação de tensão definida no caso estudado a compensação de reativos foi efetiva, porém para as violações do fluxo de potência mostrasse pouco significativa.

4.2.3 Casos de Contingência com Violação de Tensão

Após a simulação dos casos de contingência, seis apresentaram violações de tensão em barra, sendo o Caso 9 com índice de severidade bastante elevado.

A função objetivo utilizada foi a de CLTN, com o propósito de estabelecer melhor solução a controle de tensão nas barras do sistema, visto que os níveis de capacidade de transmissão nas barras não foram afetados.

Da mesma forma foi utilizada função ASHN para determinação das barras a receberem compensação reativa, seguindo os mesmos critérios dos casos apresentados no subcapítulo 4.3.2, porém com um único adendo.

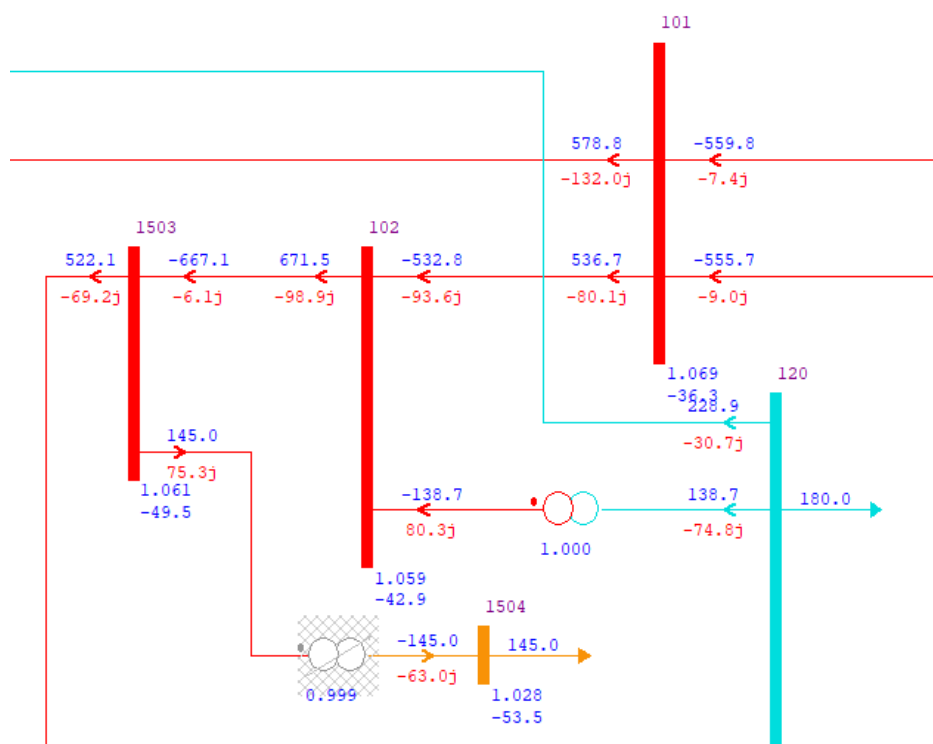
Para estes casos considerar inicialmente realizar a compensação apenas nas barras contingenciadas e que tiveram seus limites operacionais extrapolados, pois o objetivo é normalizar a tensão nas barras afetadas.

Os casos escolhidos para estudo e aplicação detalhada da metodologia proposta foram os que tiveram maior índice de severidade detectada pelo programa de análises de contingência do ANAREDE, são estes casos o 9 e 5, respectivamente.

4.2.3.1 Caso 5

A contingência analisada no Caso 5 foi entre as barras 101-Araraquara e a 102-P.Caldas, ambas pertencentes a Área 1 e com tensão de 500KV. A conexão entre estas duas barras ocorre através de apenas uma LT, sendo simulado neste caso o seu desligamento. A LT contingenciada pode ser visualizada na Figura 11.

Figura 11 – LT's Barra 101-Araraquara e 102-P.Caldas.



Fonte: Alves (2007).

Após a simulação da contingência, houve violações do nível de tensão em duas barras do sistema, a barra 1504-Itajuba (138KV) e 140-Adriano (345KV), como apresentado na Tabela 16.

Tabela 16 – Caso 5: Violações de Tensão.

Barra	Nome	Tensão Mínima Emergência	Tensão Monitorada	Tensão Máxima Emergência	Violação	Severidade
1504	Itajuba	0.95	0.942	1.100	-0.008	1.8
140	Adriano	0.95	0.939	1.100	-0.011	

Fonte: Autoria Própria.

Ambas as barras que apresentaram violação do nível de tensão são vizinhas às barras contingenciadas, sendo ambas barras conectadas a transformadores de potência abaixadores de tensão. Inicialmente não foi ativado o controle de Tap do Transformador (CTAP), porém após início das análises de contingência optou-se por ativá-las com o propósito de atenuação dos índices de violações de tensão. Ao fim não se percebeu ganho em relação a esta adição.

Foram consideradas as barras contingenciadas, assim como as barras que apresentaram as violações de tensão para alocação de potência reativa. Após a otimização do sistema foi considerada alocação de *shunt* reativos nas barras indicadas, sendo o montante apresentado na Tabela 17.

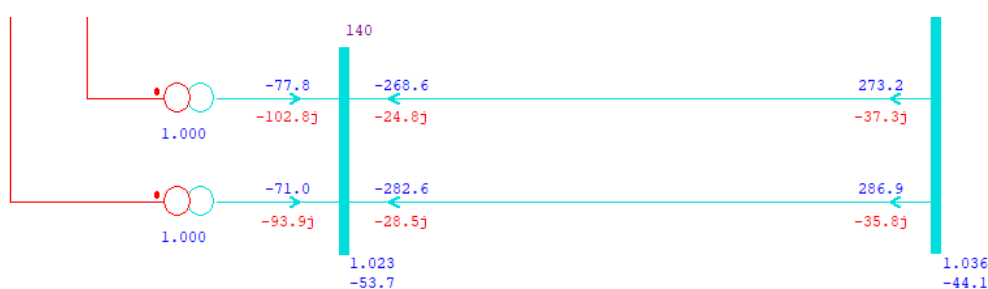
Tabela 17 – Caso 5: Potência Reativa Alocada.

Barra	Mvar
101	-42.1
102	-20.91
140	-12.87
1504	-11.2

Fonte: Autoria Própria.

Para análise da contingência e da compensação, três cenários para a tensão nas barras estudadas devem ser levados em consideração, assim como do nível de carregamento das LT's que as interligam. A tensão com o sistema em condições normais de operação, a tensão quando submetida à contingência e por fim quando submetida à contingência, porém com a adição da compensação. Nas Figuras 12, 13 e 14 é apresentado estes três cenários para a violação na barra 140, respectivamente.

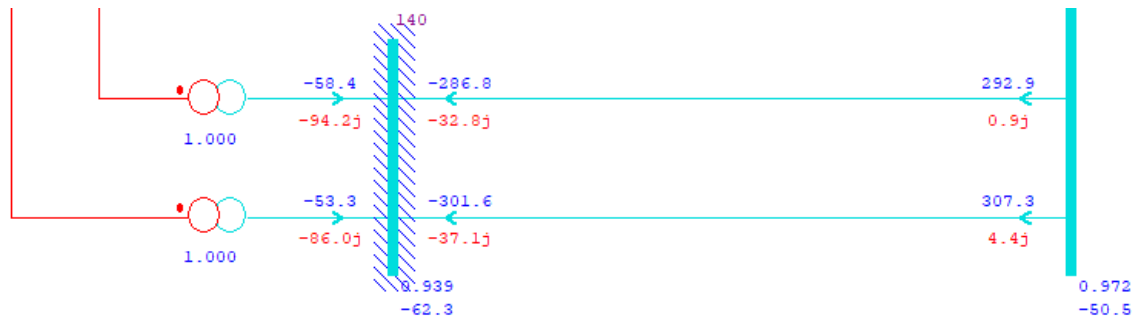
Figura 12 – Caso 5: Tensão na Barra 140 em Condições Normais de Operação.



Fonte: Alves (2007).

Saadat (1999), destaca que sistemas carregados, resultam em queda da magnitude de tensão da barra. Tal fato pode ser observado na Figura 13, analisando os fluxos de potência após a contingência, assim como a tensão na barra 140.

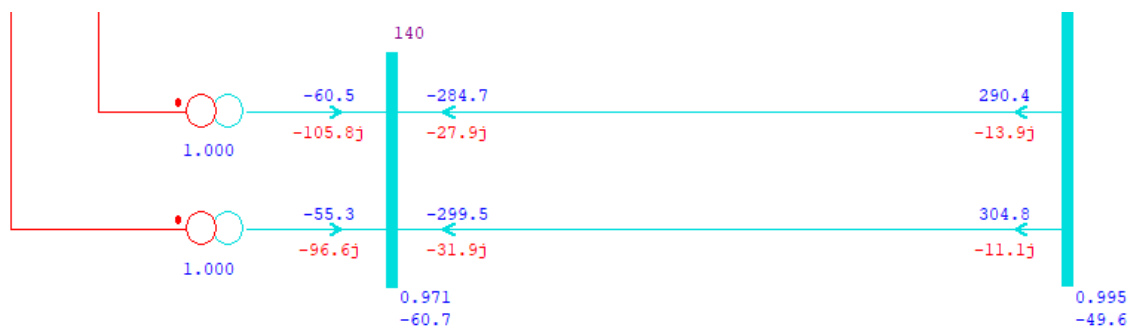
Figura 13 – Caso 5: Tensão na Barra 140 Após a Contingência.



Fonte: Alves (2007).

A compensação *shunt* é utilizada neste caso para compensar os efeitos da variação de potência reativa e ativa na linha mantendo a tensão no extremo receptor em níveis aceitáveis.

Figura 14 – Caso 5: Tensão na Barra 140 Após a Contingência com Adição da Compensação.



Fonte: Alves (2007).

Após a contingência realizada no Caso 5, as linhas vizinhas passaram a ter um aumento significativo nos seus níveis de fluxo de potência, e um decaimento dos níveis de tensão em suas barras. Tais dados podem ser visualizados na Tabela 18.

Tabela 18 – Caso 5: Comparação das Tensões nas Barras Analisadas (pu).

Barra	Antes da Contingência	Após Contingência	
		Sem Compensação	Com Compensação
101	1.069	1.033	1.065
102	1.059	0.979	1.018
120	1.041	0.988	1.011
136	1.028	0.998	1.009
138	1.036	0.972	0.995
140	1.023	0.939	0.971
1503	1.061	0.979	1.015
1504	1.028	0.942	0.974

Fonte: Autoria Própria.

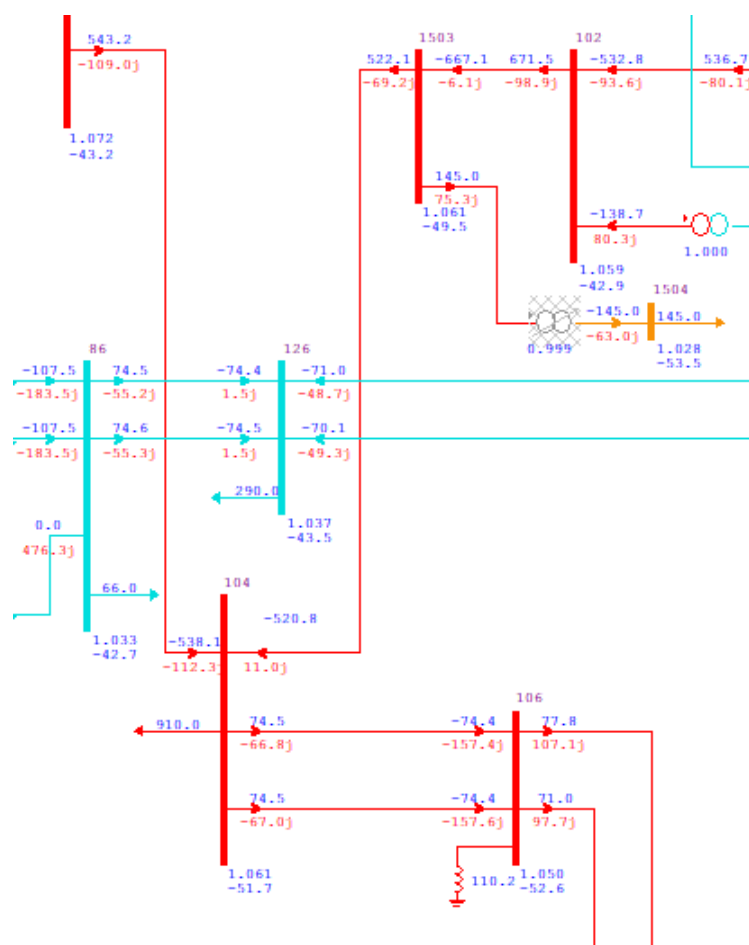
Percebe-se que a tensão nas barras vizinhas sofreu uma queda de tensão significativa em relação à sua condição normal de operação, tal queda de tensão se estende ao longo do circuito atingindo as duas barras que apresentaram violação nos seu limites, ambas em destaque na Tabela 18.

Com a compensação é possível visualizar a recuperação destes valores de tensão para limites que se encontram dentro dos estabelecidos pela ONS para sua classe de tensão.

4.2.3.2 Caso 9

A contingência analisada no Caso 9 foi entre as barras 104 - C. Paulista e a 1503 - Itajubá, ambas pertencentes à Área 1 e com tensão de 500KV. A conexão entre estas duas barras ocorre por meio de apenas uma LT, sendo simulada a sua retirada de operação. Tal conexão é apresentada na Figura 15.

Figura 15 – LT's Barra 104-C.Paulista e 1503-Itajubá.



Fonte: Alves (2007).

Dentre os casos de violações de tensão simulados, este caso apresentou níveis bastante elevados de severidade, com variações dos níveis de tensão aceitáveis para condições de emergência extremamente significativas. Tais variações podem ser visualizados na Tabela 19. O limite de tensão para operação em casos de emergência estipulado pela ONS para linhas de 500KV deve estar entre 0,95 e 1,10 pu.

Tabela 19 – Caso 9: Violações de Tensão.

Barra	Nome	Tensão Mínima Emergência	Tensão Monitorada	Tensão Máxima Emergência	Violação	Severidade
104	C. Paulista	0.95	0.888	1.100	-0.062	
106	Adriano	0.95	0.873	1.100	-0.077	234.2
140	Adriano	0.9	0.843	1.050	-0.057	

Fonte: Autoria Própria.

Neste caso foram consideradas as barras contingenciadas, assim como as barras que apresentaram as violações de tensão para alocação de potência reativa, porém a eliminação das violações não foi alcançada. Decidiu-se então, estabelecer as barras vizinhas à contingência e as que apresentaram violações de tensão, como passíveis a receber compensação. As barras indicadas podem ser visualizadas na Figura 16.

Figura 16 – Caso 9: Barras Indicadas a Compensação Reativa.

```

DCAQ IMPR
(234567890123456789012345678901234567890123456789012345
(Num)          (Qmxi (Qmxc          (Csti (CstiE
0100           100.0 100.0          0.0  0.0 1
0101           100.0 100.0          0.0  0.0 1
0102           100.0 100.0          0.0  0.0 1
0103           100.0 100.0          0.0  0.0 1
0104           100.0 100.0          0.0  0.0 1
0106           100.0 100.0          0.0  0.0 1
0122           100.0 100.0          0.0  0.0 1
0140           100.0 100.0          0.0  0.0 1
1503           100.0 100.0          0.0  0.0 1
1504           100.0 100.0          0.0  0.0 1
99999

```

Fonte: Autoria Própria.

Após a otimização do sistema foi considerada alocação de *shunt* reativo apenas nas barras indicadas na Tabela 20.

Tabela 20 – Caso 9: Potência Reativa Alocada.

(continua)

Barra	Mvar
100	-44.63
101	-31.63
102	-32.31
103	-15.09

Tabela 20 – Caso 9: Potência Reativa Alocada.

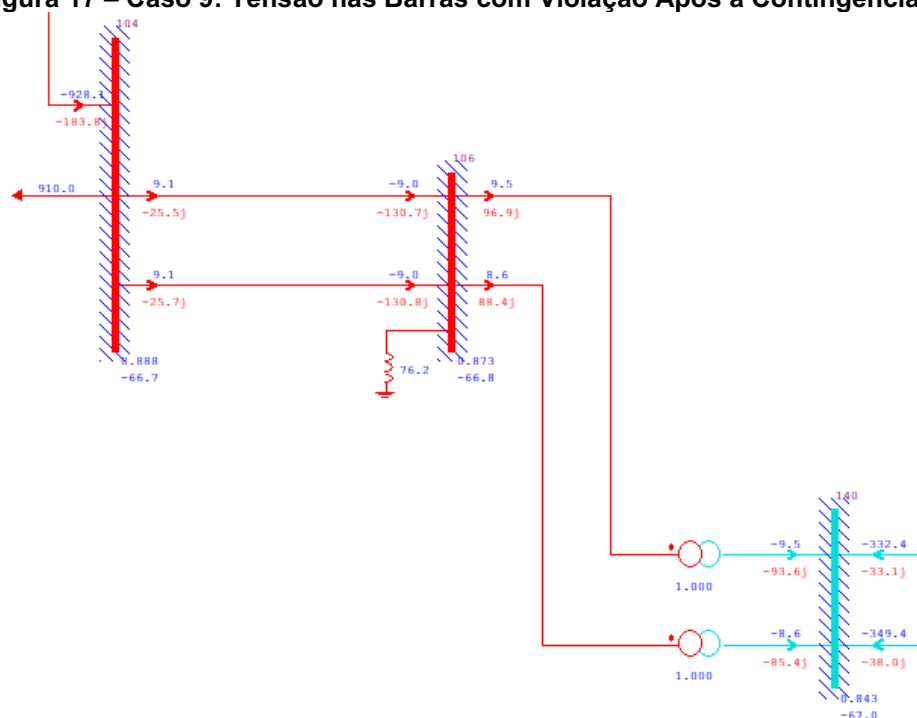
(conclusão)

Barra	Mvar
104	2.12
106	4.92
122	-29.97
140	8.39
1503	-30.12
1504	-24.24

Fonte: Autoria Própria.

A contingência analisada neste caso possui um índice de severidade bastante elevado. Este índice está diretamente associado ao fato da LT contingenciada ser a única conexão entre as barras 104 e 1503, as quais são importantes para o intercâmbio de potência entre as barras vizinhas, principalmente as barras 106 e 140. A perda de conexão, provoca um aumento do fluxo de potência e uma queda de tensão considerável na barra 104, sendo tais características também associadas as barras conectadas no sentido do seu fluxo de potência. Na Figura 17 é possível visualizar tais constatações.

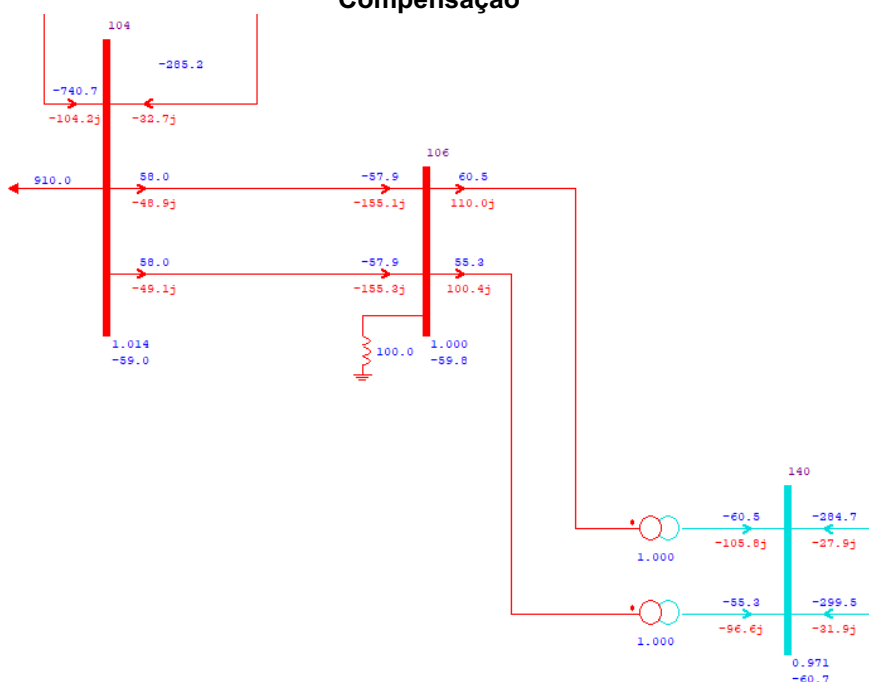
Figura 17 – Caso 9: Tensão nas Barras com Violação Após a Contingência.



Fonte: Alves (2007).

Após a adição da compensação a ser alocada, foi realizada a retirada da LT contingenciada novamente. Após a compensação o limite de tensão nas barras com violações, voltaram à faixa de magnitude definida para condições operativas de emergência, não sendo encontradas, da mesma forma, violações de tensão entre as demais barras do sistema. Na Figura 18 é possível observar os efeitos da compensação voltadas à recuperação dos níveis de tensão.

Figura 18 – Caso 9: Tensão nas Barras com Violação Após a Contingência com Adição da Compensação



Fonte: Alves (2007).

Na Tabela 21, é apresentada uma comparação dos níveis de tensão nas barras, analisadas neste caso, antes da contingência e após, com e sem a adição da compensação de reativos.

Tabela 21 – Caso 9: Comparação das Tensões nas Barras Analisadas (pu).

(continua)

Barra	Antes da Contingência	Após Contingência	
		Sem Compensação	Com Compensação
100	1.056	1.042	1.056
101	1.069	1.029	1.065
102	1.059	1.023	1.018

**Tabela 21 – Caso 9: Comparação das Tensões nas Barras Analisadas (pu).
(conclusão)**

Barra	Antes da Contingência	Após Contingência	
		Sem Compensação	Com Compensação
103	1.072	0.998	1.043
104	1.061	0.888	1.014
106	1.050	0.873	1.000
122	1.067	1.027	1.051
140	1.036	0.843	0.971
1503	1.061	1.022	1.015
1504	1.028	0.988	0.974

Fonte: Autoria Própria.

E possível avaliar que após a contingência da LT estudada, o nível de tensão nas barras próximas à contingência, sofrem uma queda acentuada, em resposta ao aumento do fluxo de potência nas barras, como apresentado na Figura 20. Após a realização da compensação indicada, o nível de tensão é recuperado, não a valores originais, mas para valores que se encontram dentro da faixa estipulada pela ONS para operação em emergências.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo principal proposto neste trabalho voltou-se a analisar as contingências em linhas de transmissão do sistema-teste STB-107CA. Em casos de violações de seus parâmetros operacionais, foi avaliada a compensação de reativos como medida a minimizar ou mesmo eliminar os impactos decorrentes destas contingências.

No que tange à análise de contingência, dos 98 casos simulados, verificou-se três situações: casos em que a convergência do método de Newton-Raphson por meio do *software* ANAREDE não foi alcançada, casos em que houve violações em seus parâmetros e casos em que a contingência não apresentou qualquer tipo de impacto significativo para o sistema.

Em casos de não convergência, verificou-se que a sua maioria estão localizadas na Área 2 do subsistema analisado, área com maior índice de intercâmbio de potência e carregamento em suas linhas. Das medidas propostas para solução desta problemática, apenas alterar o *status* das barras que interligam a LT contingenciada para barra de referência foi possível obter resposta. A convergência do fluxo de potência é importante para avaliação da contingência e assim mensurar o impacto que a mesma possui no sistema. Porém, a solução forçada do fluxo de potência não se torna assertiva para realização da análise de compensação de reativos.

Já nos casos de contingência que resultaram em violações de fluxo de potência entre determinadas linhas de transmissão, verificou-se que ocorreram em sua maioria em regiões do sistema onde o comprometimento de uma linha resultou no sobrecarregamento de linhas vizinhas. Tais constatações estão em consonância com os casos estudados para avaliação da compensação de reativos, Caso 78, Caso 93 e Caso 13.

Análise semelhante pode ser realizada para os casos em que resultaram no comprometimento dos níveis de tensão das barras. Fato que se destaca é que nestes casos sempre ocorreu queda de tensão nas barras analisadas e nunca seu aumento. O que corrobora a conclusão de que a capacidade de transmissão de uma LT, com carga muito além do seu limite, quando da ocorrência de determinadas contingências, resultam na queda da magnitude de tensão ao longo das linhas adjacentes.

A avaliação da compensação de reativos volta-se para os casos analisados como medida a minimizar ou eliminar estas violações. A escolha do local, do tipo de compensação e do montante a ser alocado é de suma importância, visto que uma compensação mal planejada pode resultar em violações e impactos severos para o sistema, como o colapso da tensão. Neste aspecto a utilização do FPO por meio do *software* FLUPOT foi fundamental para análise, sendo possível realizar uma compensação na região da contingência e das violações dos parâmetros operacionais.

A partir dos casos estudados é possível avaliar de forma positiva a adição de compensação às barras do sistema como forma de eliminação das violações de tensão. Nos três casos estudados com este tipo de violação, a adição da compensação resultou na eliminação destas e aumento dos níveis de tensão das barras analisadas a condições de operação seguras. Cabe salientar, que a compensação resultou na recuperação dos níveis de tensão das barras vizinhas a contingenciada, da mesma forma. O critério de indicar a compensação de reativos apenas as barras contingenciadas, assim como as que apresentaram violações de tensão e se necessário suas vizinhas, foi assertivo, frente aos resultados positivos.

Nos casos de violações do fluxo de potência, entretanto, a compensação de reativos não obteve resultados significativos. Reduções mínimas nos índices de severidade e pouco aumento na margem de carregamento das linhas com violações de fluxo foram alcançados. Tal fato mostra que para estes casos a compensação não seria a melhor alternativa a ser seguida para enfrentamento da problemática. Estudos voltados a corte de carga, redespacho de potência, comutação de *Tap* de transformadores ligados as barras com tensão violada em paralelo a análise de contingência seriam opções viáveis a serem realizadas.

Podem ser considerados como sugestões para trabalhos futuros, estudos adicionais voltados a análise de contingência, visando análises mais criteriosas do sistema frente a possíveis falhas, com diferentes critérios, como: contingências com critério $N_{linhas} - 2$, contingência de barras do sistema, avaliação de tratativas em casos de contingência que resultem em ilhamento de barras, assim como, estudos voltados a utilização da análise do fluxo de potência ótimo para avaliação dos custos da compensação de reativos para os casos de violação de tensão considerando diferentes tipos de compensação.

REFERÊNCIAS

ALVES, Waschington Fernandes. **Proposição de Sistemas-teste Para Análise Computacional de Sistemas de Potência**. 2007. Dissertação (Mestrado em Computação) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2007.

BARAN, Gustavo Eduardo. **Planejamento da Expansão da Geração Considerando a Conexão de Novas Plantas Geradoras Utilizando o Software ANAREDE**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2018.

BIRCHAL, M. A. S.; ERRICO, L.; VALE, M. H. M. **Processamento Paralelo Aplicado à Análise de Contingências de Sistemas Elétricos de Potência**. Em: VI Congresso Argentino de Ciências da Computação, La Plata, Argentina, outubro. 2000.

BRITO, Marcio Evaristo da Cruz. **Dispositivos de Compensação de Energia Reativa e Controle de Tensão para Redução de Perdas Técnicas em Sistemas de Distribuição**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

CARPENTIER, J. Contribution à L'étude du Dispatching Économique. **Bulletin de la Société Française des Electriciens**, Ser.8, Vol 3, p. 431-447, 1962.

CEPEL. **Programa de Análise de Redes**. Manual do usuário, V09.05.05, 2011

CHAVES, Fabrício Silveira. **Avaliação Técnica do Desempenho da Compensação Reativa Shunt Capacitiva Aplicada a Expansão de Sistemas Elétricos**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

DAHER, Renato; SANTOS, Diogo Leandro Nunes; NAZARI, Vagner. **Análise Estática de Sistemas Elétricos de Potência Utilizando o Software ANAREDE**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

DAHLKE, Diogo Biasuz. **Ajuste de Capacitores Automáticos via Fluxo de Potência Ótimo Parametrizado**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

DELGADO, Thaína Matos Santana. **Análise da Estabilidade de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência Utilizando o ANAREDE**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal da Bahia, Paulo Afonso, 2019.

DURCE, Carolina Corrêa. **Normalização Complexa e Cálculo de Fluxo de Potência para Sistemas Elétricos Emergentes**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

JUNIOR, Antonio Carlos Leal de Castro. **Estudo de Controle Preventivo para Análise do Colapso da Tensão**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

JUNIOR, Antonio Rubens Baran. **Fluxo de Potência Ótimo Trifásico**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

JÚNIOR, Raimundo Ribeiro Pinto. **Fluxo de Potência em Redes Modeladas no Nível de Subestação**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

KUNDUR, P. **Power System Stability and Control**. Ed. McGraw-Hill New York. NY, 1994.

LENTZ, G. M.; MARUJO, D.; OLIVEIRA, D. Q.; ZEFERINO, C. L.; NASCIMENTO, B. N.; JUNIOR, F. M. P. **Um Estudo Comparativo de Metodologias para Análise de Contingências em Sistemas Elétricos de Potência**. Em: Congresso Brasileiro de Automática, 2018, João Pessoa, dezembro. 2018.

MILIKITA, Miguel Armindo Saldanha. **Um Modelo de Fluxo de Potência Ótimo para Minimização do Corte de Carga**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

MONTICELLI, A. J.; GARCIA, A. **Introdução a sistemas de energia elétrica**. 2. ed. Campinas, SP: Unicamp, 2011.

MONTICELLI, Alcir José. **Fluxo de potência em Redes de Energia Elétrica**. Ed. Edgard Blücher LTDA. São Paulo, 1983.

ONS. **Submódulo 23.3**: Diretrizes e critérios para estudos elétricos. Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2016.

ONS. **“ONS – Sobre o SIN – O que é o SIN,”** [Online]. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>>. Acesso em: 19 out 2020.

PATAKA, Liciane Cândida. **Análise de Contingência com Critério $N - 1$ em Sistemas Elétrico de Potência Utilizando Computação Paralela em MATLAB**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) –

Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

QUINTELA, Adriana Scheffer. **Estudo de Índices de Proximidade ao Limite de Estabilidade de Tensão e Aplicação na Seleção de Contingências**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

QUIZHPI, Julio César López. **Planejamento de Reativos em Sistema Elétricos de Potência Multi-Área Através de Modelos Estocásticos**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2014.

ROSAS, Gracita Batista. **Modelagem de Redes no Nível de Subestação para Estudos de Fluxo de Potência Ótimo**. 2008. (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

RESENDE, P. H. O.; SANTILHO, F. P.; VASCONCELOS, L. E.; SILVA, T. V. **Compensação em Linhas de Transmissão Utilizando Compensadores Estáticos Fixos**. XI Conferência de Estudo em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais. 2013.

SAADAT, Hadi. **Power system analysis**. Ed. McGraw-Hill do Brasil, LTDA, 1999.

SESSA, Bruno da Cruz. **Avaliação de uma Ferramenta de Fluxo de Potência Ótimo para Cálculo de Limites de Intercâmbio**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

SILVA, Daniel Gomes da. **Integração entre as Atividades de Planejamento e Operação em uma Empresa de Distribuição de Energia Elétrica**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

SOUSA, Thales. **Estudo de Planejamento de Reativos em Sistemas Elétricos de Potência**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

SOUZA, A. C. Z.; SILVA, A. P. A.; JARDIM, J. L. A.; NETO, C. A. S.; TORRES, G. L.; FERREIRA, C.; FERREIRA, L. C. A. **A New Contingency Analysis Approach for Voltage Collapse Assessment**. Em: International Journal of Electrical Power and Energy System. v. 25, n. 10, p. 781-785, dezembro. 2003.

STEVENSON, William D. **Power system analysis**. Ed. McGraw-Hill do Brasil, LTDA, 1986.

TOLEDO, Lucia Helena Souza de. **Estudo de Caso de um Centro de Controle de Sistema Elétrico de Potência: Uma Abordagem Tridimensional**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2017.

APÊNDICE A – Formulação inicial do estudo do fluxo de potência

FORMULAÇÃO INICIAL DO ESTUDO DO FLUXO DE POTÊNCIA

A formulação inicial do problema fluxo de potência é fundamentada na Primeira e Segunda Lei de Kirchhoff. Segundo Monticelli (1983) as equações básicas que regem o problema podem ser descritas através da Lei dos Nós, onde as injeções de potência ativa e reativa que entram em um determinado nó do sistema devem ser iguais à soma das potências que fluem pelos elementos internos da rede que se conectam a este nó, assim como pela Lei das Malhas, onde os elementos internos de uma malha da rede são expressos como funções das tensões dos nós ao quais estes elementos estão conectados em seus terminais.

Na definição inicial do fluxo de potência cada barra do sistema possui quatro variáveis as quais são relacionadas. Duas delas são incógnitas e duas são conhecidas, dispostas pelo sistema (MONTICELLI, 1983).

As variáveis para certa barra k são:

V_k – Magnitude da tensão nodal;

θ_k – Ângulo da tensão nodal;

P_k – Geração líquida da potência ativa;

Q_k – Injeção líquida da potência reativa.

De acordo com Monticelli (1983) e Stevenson (1986) as barras mais importantes que compõem o sistema elétrico de potência podem ser divididas em:

- Barra de Carga – As barras que não possuem geração são chamadas de barra de carga. Os valores de P_k e Q_k referentes à carga do sistema são conhecidos. Nesta barra os valores de θ_k e V_k são incógnitas;
- Barra de Tensão Controlada – Toda barra onde a magnitude de tensão é mantida constante é chamada de barra de tensão controlada ou barra de geração, já que possui geradores conectados a ela. Nesta barra os valores de V_k e P_k são conhecidos, e Q_k e θ_k são incógnitas;

- Barra de Referência – Igualmente conhecida como barra slack ou barra de compensação. O ângulo da tensão V_k desta barra é utilizado como referência angular para as demais barras do sistema. Outra função importante da barra de referência é realizar o fechamento do balanço de potência do sistema. Os valores de P_k e Q_k nesta barra são incógnitas.

O cálculo do fluxo de potência é composto por duas equações básicas, Equações (5) e (6), para cada barra do sistema. Essas equações são ratificadas na Primeira Lei de Kirchhoff, onde às injeções de potências ativa e reativa que entram em uma barra do sistema correspondem à soma das potências que fluem através das linhas de transmissão e demais componentes de transmissão (MONTICELLI, 1983).

$$P_k = \sum_{m \in \Omega_k} P_{km} (V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \quad (5)$$

$$Q_k + Q_k^{sh}(V_k) = \sum_{m \in \Omega_k} Q_{km} (V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \quad (6)$$

Onde:

k – número de barras do sistema (1, 2,...);

Ω_k – conjunto de barras vizinhas à barra k ;

V_k, V_m – magnitude das tensões nas barras k e m ;

θ_k, θ_m – ângulo das tensões nas barras k e m ;

P_{km} – fluxo de potência ativa entre as barras $k - m$;

Q_{km} – fluxo de potência reativa entre as barras $k - m$;

Q_{km}^{sh} – componente relativa à injeção de potência reativa no elemento *shunt* da barra k .

Os fluxos de potência ativa e reativa que fluem através de uma linha de transmissão que interliga uma barra k a uma barra m podem ser descritas através das Equações (7) e (8), (MONTICELLI, 1983).

$$P_{km} = V_k^2 g_{km} - V_k V_m g_{km} \cos(\theta_{km}) - V_k V_m b_{km} \text{sen}(\theta_{km}) \quad (7)$$

$$Q_{km} = -V_k^2 (b_{km} + b_{km}^{sh}) + V_k V_m b_{km} \cos(\theta_{km}) - V_k V_m g_{km} \text{sen}(\theta_{km}) \quad (8)$$

De forma análoga, as Equações (9) e (10) descrevem os fluxos de potências ativa e reativa entre $m - k$:

$$P_{mk} = V_m^2 g_{km} - V_k V_m g_{km} \cos(\theta_{km}) + V_k V_m b_{km} \text{sen}(\theta_{km}) \quad (9)$$

$$Q_{mk} = -V_m^2 (b_{km} + b_{km}^{sh}) + V_k V_m b_{km} \cos(\theta_{km}) + V_k V_m g_{km} \text{sen}(\theta_{km}) \quad (10)$$

A partir do fluxo de potência que flui da barra k e entra na barra m , e do fluxo de potência que flui da barra m para a barra k , torna-se possível obter as perdas de potência ativa e reativa na linha de transmissão (JÚNIOR R., 2005 ; MONTICELLI, 1983).

$$P_{km} + P_{mk} = g_{km}(V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m b_{km} \cos(\theta_{km})) = g_{km}|E_k - E_m|^2 \quad (11)$$

$$Q_{km} + Q_{mk} = -b_{km}^{sh}(V_m^2 + V_k^2) - b_{km}|E_k - E_m|^2 \quad (12)$$

**APÊNDICE B – Fórmulas dos índices de Severidade Utilizados para
Classificação das Contingências**

Fórmulas dos Índices de Severidade Utilizados para Classificação das Contingências

A definição dos índices de severidade empregue pelo software ANAREDE para o classificação das contingências críticas é realizada através da monitoração do desempenho do fluxo de potência, da tensão e geração de potência reativa do sistema. É comparado os valores de pré contingência destas variáveis com os valores obtidos após a simulação dos casos de contingência, verificando se os limites de operação do sistema foram ultrapassados.

Estes índices são obtidos por meio da (CEPEL, 2011).

Monitoração da Tensão

O índice de severidade considerando o desempenho da tensão é determinado através da equação (9):

$$IS = \sum_{i=1}^n (VIOL)^2 * 10^4 \quad (9)$$

Na qual (*VIOL*) é estabelecido através dos limites de tensão previamente definidos com $(V - V_{min})$ ou $(V - V_{máx})$, e:

n – número de violações;

IS – índice de Severidade;

VIOL – violação da Tensão.

Monitoração do Fluxo de Potência

O índice de severidade considerando o desempenho do fluxo de potência é determinado através da equação (10):

$$IS = \frac{\sum_{i=1}^n MVA^2}{CAP^2} \quad (10)$$

Onde:

n – número de violações;

IS – índice de Severidade;

MVA – fluxo de potência;

CAP – capacidade do circuito em MVA , podendo ser utilizada a capacidade de emergência.

Caso seja realizada a monitoração de fluxo considerando a correção pela tensão, o fluxo MVA é dividido pela tensão da barra “DE” do sistema.

Monitoração da Geração de Potência Reativa

O índice de severidade considerando o desempenho da geração de potência reativa é determinado através da equação (11):

$$IS = \sum_{i=1}^n \frac{(VIOL)^2}{(Q_g^{m\acute{a}x} - G_g^{min})} \quad (11)$$

Na qual ($VIOL$) é estabelecido através dos limites de geração previamente definidos com $(Q_g - Q_g^{min})$ ou $(Q_g - Q_g^{m\acute{a}x})$, e:

n – número de violações;

IS – índice de Severidade;

$VIOL$ – violação da Tensão;

Q_g – potência gerada pela máquina.

**ANEXO A – Código Flupot Utilizado para Análise dos Casos de Contingência
Com Violação de Fluxo de Potência**

CÓDIGO FLUPOT UTILIZADO PARA ANÁLISE DOS CASOS DE CONTINGÊNCIA COM VIOLAÇÃO DE FLUXO DE POTÊNCIA

. Definição de Constantes

.

DCTE IMPR

(Mn) (Val) (Mn) (Val) (Mn) (Val) (Mn) (Val) (Mn) (Val) (Mn) (Val)

PTOL 1.0

QTOL 1.0

MXIT 250

99999

.

. Função Objetivo

.

DOBJ MXTR ASHN

.

. Controles Ativados

.

DCON QGEN TAPC VGEN

.

. Especificação dos relatórios

.

RELA CONV

COMP

.

. Dados necessários para VGEN

.

DVLB RLVO

.

(Num) (Vmn)(Vmx)(Vmn)(Vmx) RL

.

12 0.95 1.05 0.90 1.05

16 0.95 1.08 0.90 1.05

18 0.95 1.08 0.90 1.05

100 0.95 1.07 0.90 1.05

101 0.95 1.07 0.90 1.05

102 0.95 1.07 0.90 1.05

103 0.95 1.07 0.90 1.05

140 0.95 1.07 0.90 1.05

210 0.95 1.05 0.90 1.05

216 0.95 1.08 0.90 1.05

217 0.95 1.08 0.90 1.05

218 0.95 1.08 0.90 1.05

219 0.95 1.08 0.90 1.05

99999

.

. Dados necessários para função objetivo

.

(CQ) (Mn) (Mn)

.
DCAQ IMPR
(23456789012345678901234567890123456789012345

(Num) (Qmxi(Qmxc (Csti(CstiE

.
0225 100 100 0 0
0231 100 100 0 0
4501 100 100 0 0
0217 100 100 0 0
99999

.
DTRF IMPR

.
(23456789012345678901234567890
(Ar (Ar Tot (Lmin.) (Lmax.)

.
3 1
99999

.
. Função necessário para DTRF - DARI - Area de interesse

.
DARI

(Ar
1
2
3
99999

.
DLIS IMPR

CASO 78
CIRCELIM 225 231 1
99999

.
EXOT

.
. Recuperação do caso base

.
RETC BASE
RELA RBAR RTRF RVAR

.
. Salva no arquivo histórico os resultados

.
RETC BASE
SALV CASO BASE - RESULTADO DO FLUPOT
FIM