

CAPÍTULO 8

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TENSÃO EM CASOS DE CONTINGÊNCIAS DUPLAS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO COM COMPENSAÇÃO PARALELA



<https://doi.org/10.22533/at.ed.654112526028>

Data de submissão: 11/06/2025

Data de aceite: 04/07/2025

Heloisa Piano Ghellere

Universidade Tecnológica Federal do
Paraná

Medianeira, PR

<http://lattes.cnpq.br/0087684436247230>

Cristiane Lionço de Oliveira

Universidade Tecnológica Federal do
Paraná

Medianeira, PR

<http://lattes.cnpq.br/0915594224998333>

Evandro Andre Konopatzki

Universidade Tecnológica Federal do
Paraná

Toledo, PR

<http://lattes.cnpq.br/2271391188375487>

Filipe Marangoni

Universidade Tecnológica Federal do
Paraná

Medianeira, PR

<http://lattes.cnpq.br/0637440868208985>

RESUMO: O sistema elétrico brasileiro e suas redes de transmissão têm se expandido significativamente em tamanho e complexidade, resultando em maiores desafios relacionados a falhas, como interrupções no fornecimento de energia, devido a eventos externos, e instabilidades,

caracterizadas por variações bruscas nos parâmetros elétricos, como tensão e frequência, que afetam tanto a transmissão de energia quanto a confiabilidade do sistema. Este trabalho teve como objetivo analisar contingências duplas em linhas de transmissão, de critério N-2, e seus efeitos sobre a estabilidade do sistema-teste de 33 barras, definida como a capacidade de manter o equilíbrio operacional após a ocorrência de eventos, como falhas nos elementos da rede causado por eventos climáticos. Para isso, foram considerados três cenários distintos de estudo: caso base, pós-contingência e pós-compensação paralela. A compensação paralela foi abordada na última etapa do trabalho, como um método de melhorar o perfil de operação das barras do sistema após contingências, mantendo os parâmetros elétricos dentro dos limites estabelecidos pela ONS. As contingências duplas no sistema-teste foram simuladas por meio da utilização do software ANAREDE e o fluxo de potência foi resolvido utilizando o método de Newton-Raphson. No total, 2.465 casos de contingências duplas foram simulados dos quais 1.104 apresentaram convergência. A partir destes, foi selecionado dois casos, com base no nível de queda de tensão

observado nas barras do sistema, em comparação com os limites estabelecidos pelo ONS para condições operativas de emergência. Também foi observado a importância das barras envolvidas, avaliada pelo impacto no desempenho geral do sistema, permitindo focar nas situações mais críticas, aquelas barras em que os limites de tensão foram extrapolados, comprometendo a estabilidade e o funcionamento dos demais elementos da rede. Para a aplicação da compensação paralela, utilizou-se o software FLUPOT, que permitiu determinar a quantidade de potência reativa necessária para corrigir a tensão de cada barra em condição crítica, ou seja, as barras, nas quais, os valores de tensão estavam fora dos limites definidos pela ONS, para a operação emergência, entre 0,90 e 1,05 pu. Cada caso selecionado teve sua necessidade de compensação avaliada individualmente, garantindo ajustes adequados. Após a aplicação da compensação paralela, observou-se a elevação das tensões nas barras críticas, e os níveis de tensão ajustados permaneceram dentro do que o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) estabelece. Foi também feito a análise das curvas PVs das barras do sistema nos três cenários, pré-contingência, pós- contingência N-2 e pós-compensação, sendo de extrema importância sua análise, pois permitiu avaliar a margem de estabilidade de tensão de cada barra e indicar se o sistema estava próximo de sofrer um aumento de tensão. Após a ocorrência das contingências, constatou-se uma redução significativa dos níveis de tensão, especialmente nas barras 965, 964, 976 e 1210. Os dois casos analisados apresentaram margens de estabilidade e carregamento abaixo de 4%, valor mínimo recomendado. No entanto, com a alocação de reativos por meio da compensação paralela, essas margens foram elevadas, atingindo os limites aceitáveis estipulados pelo ONS, o que garantiu a operação segura e confiável do sistema.

PALAVRAS-CHAVE: Fluxo de Potência. Energia Elétrica. Contingências Múltiplas. Estabilidade de Tensão.

VOLTAGE STABILITY ANALYSIS IN CASES OF DOUBLE CONTINGENCIES OF TRANSMISSION LINES WITH SHUNT COMPENSATION

ABSTRACT: The Brazilian power system and its transmission networks have expanded significantly in size and complexity, leading to heightened challenges related to failures—such as energy supply interruptions caused by external events—and instabilities characterised by abrupt variations in electrical parameters (e.g., voltage and frequency). These phenomena adversely affect both power transmission and system reliability. This study analyses double contingencies in transmission lines under the N-2 criterion and their effects on the stability of a 33-bus test system, defined as the ability to maintain operational equilibrium after events such as weather-induced failures in network components. Three distinct scenarios were examined: base case, post-contingency, and post-parallel compensation. Parallel compensation was implemented in the final stage as a method to improve the operational profile of system buses after contingencies, ensuring electrical parameters remained within limits established by Brazil's National Electric System Operator (ONS). The double contingencies were simulated using the ANAREDE software, with power flow solved via the Newton-Raphson method. Of 2,465 simulated cases, 1,104 achieved convergence. Two cases were selected based on the severity of voltage drops observed at system buses, compared to ONS emergency operating limits. The FLUPOT software determined the reactive power required to correct voltages at critical buses (those exceeding the ONS emergency range of 0.90 to 1.05 pu).

Compensation was individually tailored for each case. Post-compensation, voltage levels at critical buses were restored to acceptable limits. PV curve analysis across the three scenarios (pre-contingency, N-2 post-contingency, and post-compensation) revealed significant voltage reductions, particularly at buses 965, 964, 976, and 1210. Initially, both cases exhibited voltage stability and loadability margins below 4% (the minimum recommended threshold). However, parallel reactive compensation increased these margins to ONS-approved levels, ensuring secure and reliable system operation..

KEYWORDS: Power flow, Electric power, Multiple contingencies, Voltage stability.

INTRODUÇÃO

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) brasileiro tem crescido significativamente nos últimos anos. No Brasil, o SEP é capaz de conectar os estados e transmitir energia elétrica a grandes distâncias, permitindo o aproveitamento das potencialidades energéticas de cada região do país (COSTA, 2021).

O Sistema é composto por quatro subsistemas: Sul, Sudeste, Nordeste e Norte, interligados para facilitar a transmissão de energia entre eles (ONS, 2018). Para garantir que essa transmissão seja de qualidade e confiável, evitando problemas para o consumidor, é necessário manter valores limites pré-estabelecidos nas tensões das barras dos sistemas (SOUZA, 2003).

Com o crescimento contínuo do sistema após os anos, houve um aumento significativo da carga demanda. Inicialmente, o sistema operava com níveis de segurança alto, mas, com a elevação da demanda, o sistema torna-se suscetível a colapsos e interrupções, que fazem com que o fornecimento da energia elétrica seja interrompido. (PATACA, 2012; JABUINSKI, 2021).

Além disso, é fundamental que o sistema mantenha padrões de segurança capazes de suportar eventos naturais, falhas em linhas de transmissão e desligamentos de unidades geradoras, os quais podem alterar o ponto de operação do sistema. Esses eventos são denominados como contingência, que são caracterizados pela saída ou a retirada de um ou mais componentes da rede. Quando ocorre a perda simultânea de dois componentes do sistema elétrica, classifica-se como uma contingência de critério N-2 também conhecida como múltiplo critério (Lobo, 2022).

Em situações de contingências, o sistema deixa de ser confiável. Por meio de simulações e seus resultados preliminares, é possível capacitar os operadores do sistema a tomar ações mais rápidas, visando garantir o abastecimento de energia elétrica (JABUINSKI, 2021).

Para lidar com o aumento da demanda por carga e os efeitos provocados pelas contingências, uma alternativa é a utilização do conceito de Margem de Carregamento, também conhecida como margem de estabilidade de tensão (CANTARINO, 2007). A margem de estabilidade é definida como o acréscimo máximo de carga que o sistema

consegue suportar, partindo de uma condição operativa inicial, até atingir o ponto crítico onde a tensão se torna instável. Uma das formas de se estimar essa margem é por meio da construção e análise das curvas PV (Potência x Tensão), que fornecem uma representação gráfica do comportamento do sistema sob aumento gradual de carga. As curvas PV são obtidas por meio da realização de múltiplos cálculos de fluxo de potência, utilizando o método de Newton-Raphson como ferramenta de solução. (MENEZES, 2002).

Do ponto de vista econômico e dos benefícios para a rede elétrica, uma solução eficaz para os problemas relacionados ao Sistema de Energia Elétrica é a utilização da compensação paralela de reativos. Quando elaborada de forma apropriada, a compensação de reativos proporciona um equilíbrio entre geração e consumo de potência reativa, permitindo ajustes no fator de potência e garantindo uma operação adequada no controle de tensão (VALADARES; VALE, 2001).

O presente trabalho tem por finalidade realizar um estudo de análise de estabilidade de tensão no Sistema-Teste brasileiro de 33 barras, sob condições operativas normais, seguida por simulações de contingências duplas de linhas de transmissão e após a aplicação de compensação de reativos em paralelo. Além disso, busca-se aplicar a compensação e a quantidade adequada de reativos para os casos em que há violação de tensão.

A resolução dos problemas de contingência foi realizada por meio do software ANAREDE®, desenvolvido e disponibilizado pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL). Esse programa computacional permite a simulação e análise do fluxo de potência em sistemas elétricos, oferecendo suporte para a avaliação de condições operativas e identificação de possíveis violações no sistema (CEPEL, 2011).

Interligado ao programa ANAREDE®, o software FLUPOT, também desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), permitiu identificar os pontos de operação que atendam às restrições operacionais de tensão estabelecidas pelo ONS para condições operativas normais e de emergência. Essas restrições, incluem limites mínimos e máximos de tensão em pu para diferentes níveis de tensão nominal, garantindo que o sistema opere dentro de parâmetros aceitáveis, mesmo em situações críticas (CEPEL, 2011; ONS, 2018).

METODOLOGIA

O objetivo deste trabalho foi analisar os impactos de contingências duplas sobre o sistema elétrico brasileiro STB-33, por meio da simulação do desligamento de linhas de transmissão. A análise é realizada com programa computacional ANAREDE, que permite identificar os pontos em que ocorrem violações de limites operacionais, relacionados às tensões nas barras do sistema. Além disso, busca-se aplicar a compensação paralela para minimizar as violações de tensão, identificar as curvas PV em diferentes condições operacionais, e classificar as contingências com base nas margens de carregamento, determinados com base nos estudos de fluxo de potência e estabilidade do sistema.

As análises das contingências de critérios N-2, foram desenvolvidas no sistema-teste STB-33, desenvolvido por Waschington Fernandes Alves. Nesse sistema-teste, as fontes de tensão da região Sudeste estão distantes do centro de carga de Campinas, Poços de Caldas, Itajubá e Cachoeira Paulista. Essa configuração resulta em um carregamento excessivo das linhas de transmissão e pouca compensação de reativos de carga, resultando em problemas no controle de tensão (ALVES, 2007). O sistema-teste abrange os subsistemas das regiões Sul e Sudoeste, que estão interconectados por dois grandes circuitos de 230 e 500 kV.

O procedimento adotado para a análise das contingências de critério N-2 e avaliação da compensação de reativos no sistema-teste pode ser representado pelo fluxograma ilustrado na Figura 1.

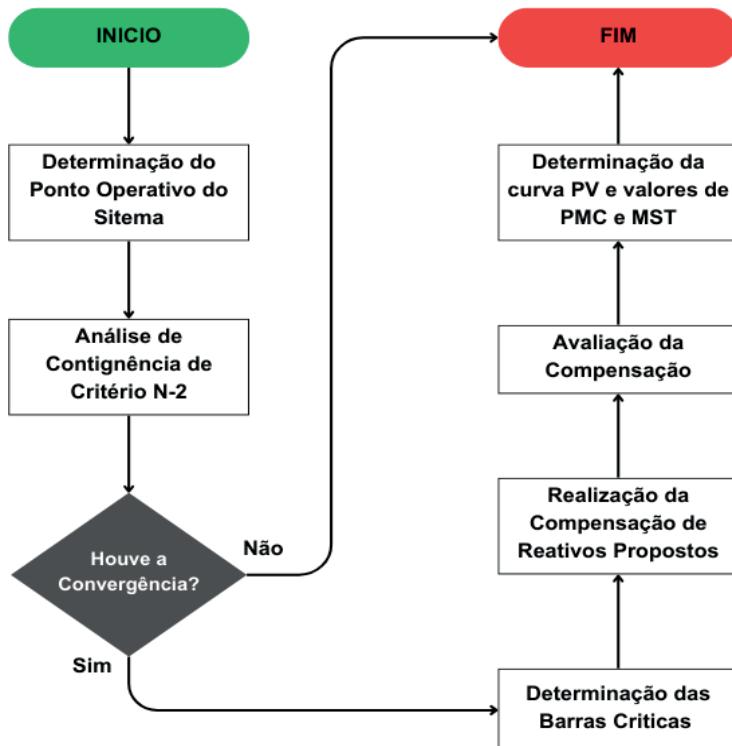


Figura 1 - Fluxograma.

Fonte: Autoria Própria.

Utilizando o software ANAREDE, foi possível calcular o fluxo de potência, realizar a análise de contingência e gerar as curvas PV permitindo a análise de estabilidade. As curvas PV foram geradas com o objetivo de determinar a margem de carregamento dos sistemas em três casos: antes da contingência, após a contingência e após a aplicação de compensação de reativos. Para a determinação da margem de carregamento, foi utilizado o Programa de Fluxo de Potência Continuada do ANAREDE, que permitiu realizar incrementos de carga.

A compensação paralela foi realizada utilizando o programa FLUPOT, que é integrado ao ANAREDE, o qual permite o planejamento da compensação de reativos. Essa compensação teve como finalidade eliminar as violações de tensão observadas após as contingências em linhas de transmissão. O FLUPOT determinou a quantidade de reativos necessária para cada barra que fosse receber a compensação paralela.

Determinação do Ponto Operativo do Sistema

A etapa inicial deste trabalho consistiu-se na determinação do ponto de operação do sistema. Essa etapa foi de suma importância, para conseguirmos definir as tensões nas barras e os fluxos de potência nas linhas sob condições normais, após, se faz possível comparar os efeitos das contingências em relação ao estado inicial. Para isto, foi realizado o fluxo de potência, calculado utilizando o método de Newton-

Raphson por meio do programa ANAREDE. O principal objetivo deste é, obter os dados e parâmetros necessários para as análises subsequentes, onde será simulada a contingência dupla em linhas de transmissão específicas.

Análise de Contingência N – 2

Para se realizar as análises de cada contingência, utilizou-se o código de execução Análise de Contingência Programada do ANAREDE. Esse recurso permitiu que fosse possível retirar duas linhas do sistema simultaneamente, facilitando a observação dos resultados, visto que, para cada contingência é realizado o cálculo do fluxo de potência, através do método de Newton-Raphson, acompanhando o estado operativo do sistema e gerando um relatório de monitoramento, onde foi possível observar, entre uma série de controles, o Controle de Limite de Tensão; o controle de Potência Reativa e o Fluxo de Potência.

Determinação das Barras para a Compensação

Após a realização das análises de contingência, foi determinada as barras do sistema-teste onde seria realizada a compensação de reativos paralela. A determinação foi baseada em alguns critérios, entre eles, a de Avaliação de Severidade, que envolve a comparação entre os valores de fluxo, tensão e potência reativa gerada antes e depois da contingência, analisado a partir do Monitoramento de Tensão; Monitoramento de Geração de Potência Reativa e do Monitoramento do Fluxo de Potência que é disponibilizado pelo ANAREDE.

A severidade foi identificada observando os parâmetros elétricos em relação aos valores de pré contingência, principalmente a queda de tensão abaixo do limite de 0,90 pu, como é definido pela ONS para situações de emergência. As barras que apresentaram o

maior desvio de tensão e alteração no fluxo de potência foram consideradas mais críticas, e, por isso, foram selecionadas para receber a alocação de reativos, afim de reestabelecer os níveis de tensão aceitáveis para a operação.

Para identificar as violações de tensão no sistema, foram considerados os limites operativos estabelecidos pelo ONS para diferentes níveis de tensão nominal, em condições normais e em condições de emergência, conforme apresentado na Tabela 1.

Tensão Nominal de Operação (kV)	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 632	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	0,90 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

Tabela 1 - Limites de Tensão para Condições operativas de Emergência.

Fonte: ONS (2018)

Além do Critério de Severidade, também foi aplicado o Critério de Atendimento ao Controle de Tensão - Análise de Sensibilidade. Nesse processo, foi identificado as barras com maior influência sobre o sistema elétrico de potência (SEP), aquelas barras em que as variações de tensão provocam impactos na estabilidade do sistema e afetam a rede ao seu redor, considerando a variação de tensão e a menor geração de potência reativa.

Realização da Compensação Paralela

Nesta etapa do trabalho, após a identificação das barras com violações dos limites de tensão estabelecidos pela ONS para condições de emergência, aplicou-se a compensação reativa por meio do software FLUPOT. Esse processo permitiu determinar, tanto o montante necessário de potência reativa, quanto as barras mais adequadas, aquelas que apresentavam maior severidade e impactavam na estabilidade do sistema.

Como o FLUPOT e o ANAREDE estão interligados, os resultados da compensação, como, a elevação dos níveis de tensão das barras críticas, puderam ser analisados diretamente no ANAREDE, através do relatório de monitoração, garantindo uma avaliação mais precisa da compensação reativa nas barras críticas sobre o sistema elétrico, sendo possível um melhor controle de tensão.

Identificação das Curvas PV

O último passo deste trabalho foi determinar as Curvas PV, juntamente com o método do fluxo continuado, mencionado na seção 3, obteve-se a margem de carregamento para três casos diferentes: caso base, caso pós contingências de critério N-2 e após a locação de reativos.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, são apresentados os resultados das simulações de contingência de critério N-2 no sistema teste STB-33, considerando três diferentes cenários: operação em condições normais, após a ocorrência da contingência e após a alocação de reativos. Inicialmente, foi definido o ponto operativo do sistema. Em seguida, realizaram-se as simulações de contingência, cujos resultados permitiram identificar as barras mais adequadas para a alocação dos reativos. Por fim, avaliou-se se essa alocação teve um impacto positivo, contribuindo para a redução das violações de tensão.

Análise em caso de Contingências duplas de linha de transmissão em um sistema-teste STB-33

O sistema-teste STB-33, proposto por Alves (2007), é dividido em duas áreas principais, Área A e Área B, e abrange os subsistemas das regiões Sul e Sudeste do Brasil. O diagrama unifilar – apresentado na Figura 2 – ilustra as conexões entre as usinas hidrelétricas, os centros de carga e as linhas de transmissão, com tensões nominais de 230 kV e 500 kV.

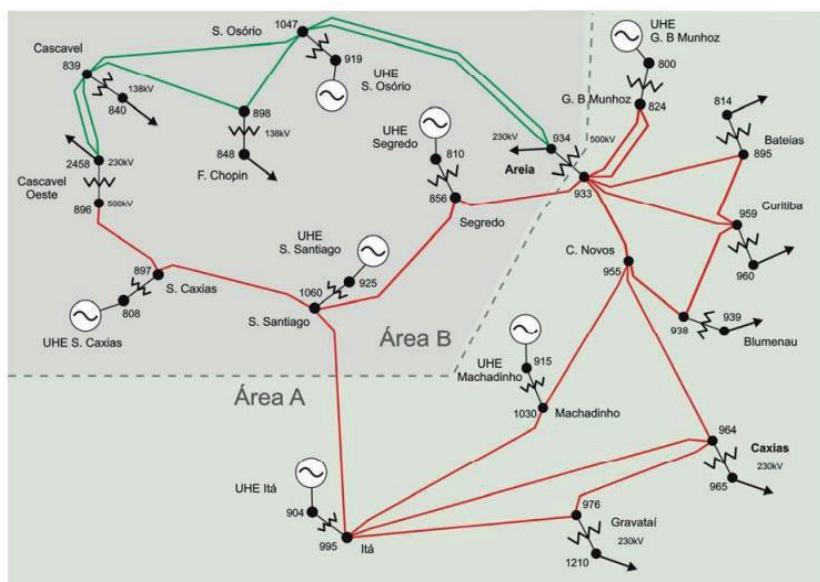


Figura 2 – Sistema-teste STB-33

Fonte: Alves (2007)

O sistema analisado é composto por 33 barras, 7 geradores e 9 barras de carga, atendendo a uma demanda total de 5,085 MW, com uma capacidade de geração de 8,912 MW. Ele é separado em duas áreas, A e B, sendo que a área A concentra a maior parte da carga e, por isso, necessita importar energia da área B para equilibrar o fornecimento.

Após a definição do ponto operativo do sistema, definido por meio do fluxo de potência pelo método Newton-Raphson. O primeiro passo que se realizou, onde foram delimitados os parâmetros operacionais para o monitoramento, o próximo passo, são as simulações de contingência através da função de Analise de Contingência, Programa do ANAREDE. O software exibe um relatório de monitoramento, detalhando cada caso simulado e mostrando se houve ou não a convergência, e, os parâmetros que foram violados e seus respectivos valores de violação.

No desenvolvimento desse trabalho, foram simulados 2.465 casos de contingência de linha dupla, destes, 775 casos, não foi possível obter a convergência por meio do fluxo de potência e 587 casos resultaram em ilhamento. O ilhamento ocorreu quando, após a retirada simultânea de duas linhas de transmissão, parte do sistema elétrico ficou isolado do restante, sem conexão com as fontes de geração ou sem possibilidade de escoamento de carga, levando à exclusão dessas barras da análise. Por fim, 1.104 simulações alcançaram a convergência.

Compensação Paralela

Quando uma contingência ocorre, é de suma importância que uma medida seja tomada para diminuir os danos causada por esse contingenciamento. A compensação paralela se torna uma solução viável, e, consiste na alocação de potência reativa, que visa fazer com que as tensões que foram violadas voltem a operar dentro dos limites operativos aceitáveis.

Dentre as 1.104 simulações que alcançaram a convergência, quatro casos foram selecionados para receber a compensação, seguindo os critérios estabelecidos no item 3.3. Nos quatro casos, a barra 976 se destaca por estar presente em todos eles e por apresentar violação de tensão, evidenciando que se trata de um ponto crítico na rede. Além disso, observa-se um padrão nos desligamentos de linhas de transmissão que causam esse impacto: sempre que a barra 955 ou 995, ambas conectadas à barra 964, é retirada junto com outra linha da rede, a barra 964 entra em condição crítica.

Para a alocação de reativos foi utilizado o programa FLUPOT e a função objetivo CLTN (Controle de Tensão), que identifica os ajustes necessários para manter os níveis de tensão dentro dos limites estabelecidos pelo ONS, conforme especificado no item 3.3. Entre os casos quatro casos analisados, dois apresentaram violações de tensão e dois casos evidenciaram tanto violações de tensão quanto irregularidades no fluxo de potência. A compensação também foi aplicada às barras vizinhas que apresentavam violações

nos parâmetros, com base nos valores calculados pelo FLUPOT, pois, observou-se que essa correção não apenas beneficiava as barras diretamente compensadas, mas também impactava outras partes do sistema. Com isso, foi possível ajustar a rede para que operasse dentro dos limites estabelecidos.

Análise de Contingência - Caso 737

A contingência do caso 737 se dá devido a retirada das linhas entre as barras de 898-Foz do Chopin e 1047-Salto Osório e entre as barras 955-Campos Novos e 964-Caxias, estando na área B e A respectivamente. A as linhas entre as barras 898 e 1047 tem uma tensão de 230kV e entre as barras 955 e 964 500kV, ambas os casos possuem somente uma única ligação entre esses barramentos.

Um dos motivos pela escolha deste caso, além de observar os limites de tensão, que ficaram abaixo dos limites emergenciais estipulados ONS, se dá porque a barra 1047 gera grande impacto na Area B quando retirado uma linha, pois, apesar das presentes transformações entre os níveis 138 kV e 230 kV nas proximidades, estas, não oferecem suporte suficiente para sustentar a barra em cenários de contingência.

O sistema-teste foi submetido à contingência, estipulada pela retirada de duas linhas de transmissão, por meio de simulação no Software ANAREDE, e pode ser representado pela Figura 3.

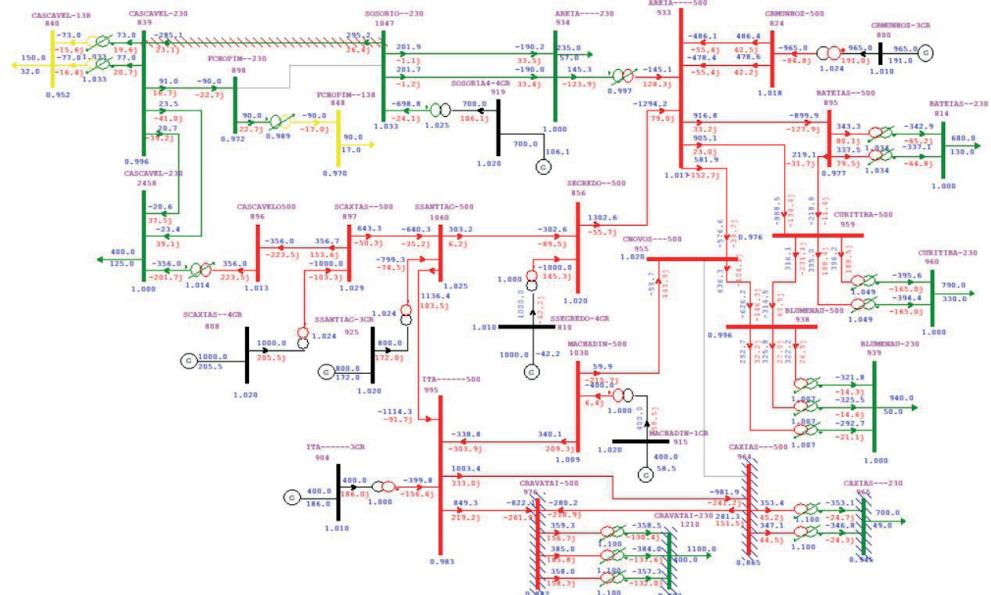


Figura 3 - Caso 737 após a retirada de duas linhas de transmissão

Fonte: Autoria Própria.

Observa-se que houve a redistribuição dos fluxos de potência e as variações de tensão, evidenciada pelas alterações nas barras destacadas com hachuras no diagrama. Como consequência da contingência, identificaram-se sobrecargas de tensão em diversas partes do sistema, conforme detalhado nas Tabelas 2 e 3.

O monitoramento de tensão fornecido pelo software ANAREDE, após a ocorrência da contingência simulada pode ser visualizado na Tabela 2.

Barra	Nome	Área	Tensão de Emergência (pu)			Violação (pu)	Severidade
			Mínima	Monitorada	Máxima		
965	Caxias--230kV	A	0,950	0,945	1,100	-0,005	*
1210	Gravataí--230kV	A	0,950	0,902	1,100	-0,48	*****
964	Caxias--500kV	A	0,950	0,856	1,100	-0,085	*****
976	Gravataí--500kV	A	0,950	0,842	1,100	-0,108	*****
Índice de Severidade: 212,1							

Tabela 2 - Relatório de Monitoramento de Tensão fornecido pelo ANAREDE

Fonte: Autoria Própria

Os dados mostram as tensões monitoradas em quatro barras localizadas na Área A do sistema-teste STB- 33, comparadas aos limites mínimos e máximos permitidos em condição de emergência. Observou-se que todas as barras apresentaram violações de tensão, com valores monitorados abaixo do limite mínimo de 0,950 pu. As maiores quedas ocorreram nas barras 964 (Caxias–500 kV) e 976 (Gravataí–500 kV), com 0,085 pu e 0,108 pu, respectivamente, indicando alta severidade. O índice de severidade total foi de 212,1, portanto se fez necessário o uso de medidas que melhorassem as violações de tensão, como a compensação de reativos.

Já o monitoramento dos fluxos de potência, também obtido por meio do software ANAREDE pode ser apresentado pela Tabela 3. Os dados referem-se à barra 839, ligada à subestação de Cascavel, 230 Kv e mostrou que foram registradas duas ocorrências de violação, com fluxo de potência ativa (Mw) de -285,1 MW e potência reativa (Mvar) de 23,1 Mvar. O carregamento resultante foi de 287,1 MVA/V, com uma violação de 98,1 MVA e índice de severidade de 2,3.

Barra	Nome	Fluxos				Violão (MVA)	Carregamento Severid. (%)
		(Nc)	(Mw)	(Mvar)	(MVA/V)		
839	Cascavel 230kV	2	-285,1	23,1	287,1	98,1	151,92
Índice de Severidade: 2,3							

Tabela 3 - Relatório de Monitoramento de Fluxos fornecido pelo ANAREDE

Fonte: Autoria Própria

É possível observar que as barras 1210, 964 e 976 apresentaram os maiores índices de severidade, ficando abaixo do valor de 0,95 indicado pela ONS, para situações de emergência. Diante disso, optou-se por realizar a compensação nas barras vizinhas e não apenas naquelas de onde as linhas foram retiradas, uma vez que o ajuste dessas barras já é suficiente para equilibrar o sistema. Essa escolha é de extrema importância, pois, no programa FLUPOT, onde é feita a compensação, é necessário indicar previamente as barras que receberão os reativos, assim como seus respectivos valores máximos e mínimos de compensação.

Com a alocação de shunts reativos nas barras, conforme apresentado na Tabela 4, os respectivos valores foram inseridos no programa ANAREDE, a fim de realizar uma nova simulação. O objetivo foi verificar se os valores de compensação obtidos são, de fato, eficazes na redução dos efeitos provocados pela contingência.

A potência reativa alocada em cada uma das barras críticas – identificadas nas análises anteriores – é apresentada na Tabela 4, como forma de compensação para corrigir as violações de tensão. A alocação foi realizada nas barras 965 e 964, associadas à subestação de Caxias, e nas barras 1210 e 976, associadas à subestação de Gravataí, com níveis de 230 kV e 500 kV.

Barra	Nome	Mvar
965	Caxias--230kV	31,13
1210	Gravataí--230kV	33,03
964	Caxias--500kV	30,94
976	Gravataí--500kV	32,42

Tabela 4 - Potência Reativa Alocada

Fonte: Autoria Própria

Os valores de potência reativa variam entre 30,94 Mvar e 33,03 Mvar, sendo definidos com base nas necessidades específicas de cada barra para restaurar os níveis de tensão dentro dos limites operacionais. Essa compensação foi fundamental para a estabilização do sistema após a ocorrência das contingências simuladas.

Os valores de tensão nas barras associadas às linhas de transmissão submetidas à contingência são apresentados na Tabela 5. É possível, a partir desses dados, realizar uma comparação entre as tensões nas condições operativas normais, após a ocorrência da contingência e após a aplicação da compensação paralela.

Barra	Nome Após Contingência	Caso base Após alocação de Reativos	Tensão (pu)	
839	Cascavel--230kV	1,004	0,996	1,001
895	Bateias--500kV	1,022	0,977	0,996
933	Areia--500kV	1,045	1,017	1,029
938	Blumenau--500kV	1,053	0,996	1,019
955	Campos Novos--500kV	1,082	1,020	1,044
959	Curitiba--500kV	1,023	0,976	0,996
964	Caxias--500kV	1,076	0,865	0,968
965	Caxias--230kV	1,000	0,945	1,000
976	Gravataí--500kV	1,056	0,842	0,951
995	Itá--500kV	1,071	0,983	1,021
1210	Gravataí--230kV	1,001	0,902	1,000
1047	Salto Osório-- 230kV	1,031	1,033	1,033

Tabela 5 - Comparação da Tensão para os três casos simulados

Fonte: Autoria Própria

Embora as barras 964 e 976 sejam consideradas críticas para o sistema, por estarem localizadas em regiões de grande influência no escoamento de carga, elas também se encontram em nós estratégicos de transformação (de 500 kV para 230 kV), o que as torna particularmente sensíveis em situações de contingência. Nessas condições, é comum que sejam diretamente impactadas, apresentando violações nos limites operativos. No entanto, com a aplicação dos valores de compensação apresentados na Tabela 5, observa-se que as barras retornam a operar dentro dos limites de tensão estabelecidos pela ONS.

A aplicação da compensação de reativos nas barras críticas do sistema-teste para o Caso 737 apresenta o diagrama unifilar representado na Figura 4. A alocação de reativos foi eficaz na correção das violações de tensão, com elevação dos valores nas barras mais afetadas, como Gravataí e Caxias. Os níveis de tensão, ficaram dentro dos limites operacionais, mostrando eu houve um acerto na compensação empregada, que restaurou a estabilidade do sistema.

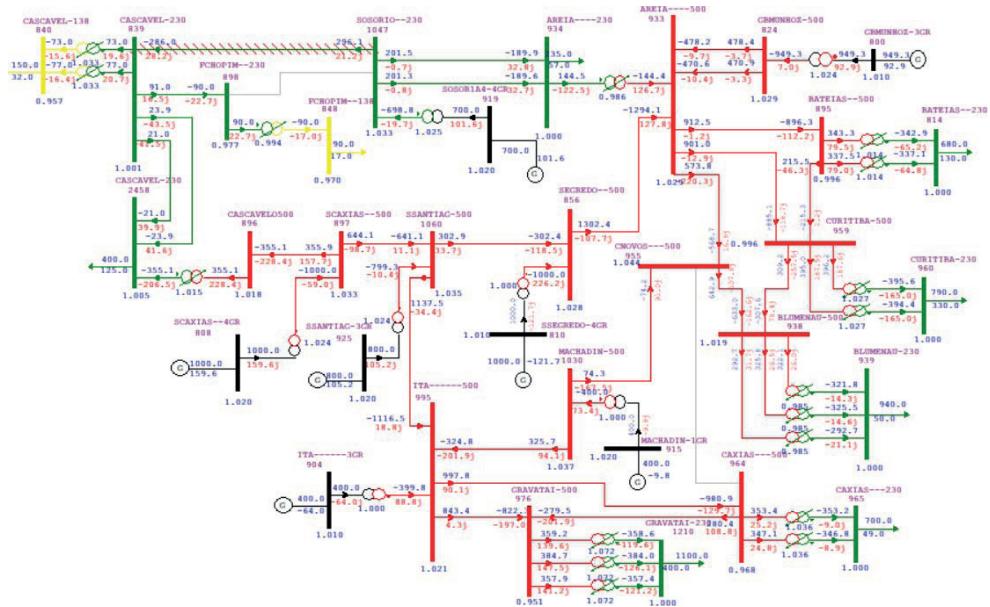


Figura 4 - Caso 737 após a alocação de reativos

Fonte: Autoria Própria

Com relação ao monitoramento do fluxo, a compensação paralela é um mecanismo utilizado para melhorar o perfil de tensão, portanto, esse método tem pouco impacto sobre os fluxos de potência ativa nas LT. Neste caso, mesmo após várias simulações adicionando diversos valores de compensação reativa, ainda se observa que o valor da severidade do fluxo não muda, porque, depende muito de outros fatores, do que da adição de reativos nas barras vizinhas.

Portanto, para melhorar esse índice, seriam necessárias outras técnicas para que se alterasse o fluxo de potência ativa, que permitirá com que o sistema encontre caminhos alternativos para o escoamento de potência e reduza a dependência da linha sobrecarregada.

Análise de Contingência - Caso 1651

No caso 1651 a contingência foi realizada entre as barras 995-Itá e 964- Caxias e entre as barras 1210-Gravataí-230 e 976-Gravataí. Ambas as barras estão na área A e com tensão de 230kV e 500kV. A conexão entre as barras 995 e 964 ocorre através de uma LT, sendo simulado neste caso o seu desligamento. Já na barra 1210 e 976, a conexão ocorre através de três LT e neste caso, foi feito o desligamento da segunda linha de transmissão, como é mostrado na Figura 5.

Essas barras estão sujeitas a sofrerem sobretensão com a retirada de duas LT, por conta de que estão em áreas de transformação, de 500kV para 230kV e concentram um

fluxo de energia que alimentam as cargas mais baixas. Além disso, ocorre uma sobrecarga nos transformadores das barras vizinhas, como exemplo, a barra 959-Curitiba, que acaba absorvendo uma parcela do fluxo que tem que ser redistribuído

O comportamento do sistema-teste STB-33 no Caso 1651 (após a retirada de duas linhas de transmissão) é apresentado na Figura 5. É possível observar que houve alterações nos fluxos de potência e quedas de tensão em diversas barras do sistema, indicando a ocorrência de violações. Algumas linhas foram sobrecarregadas devido à redistribuição dos fluxos, enquanto barras críticas, como Gravataí e Caxias, apresentaram tensões abaixo dos limites mínimos estabelecidos.

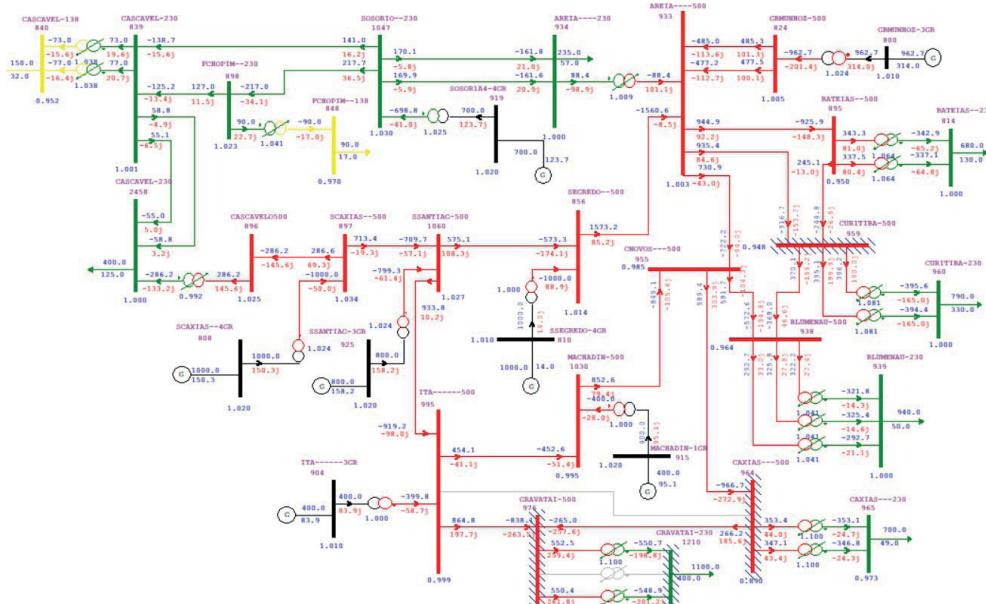


Figura 5 - Caso 1651 após a retirada de duas linhas de transmissão

Fonte: Autoria Própria

O relatório de monitoramento de tensão para o Caso 1651, com base nos dados obtidos pelo ANAREDE é apresentado na Tabela 6.

Barra	Nome	Área	Tensão de Emergência (pu)			Violação	Severidade
			Mínima	Monitorada	Máxima		
959	Curitiba--500kV	A	0,950	0,948	1,100	-0,002	*
1210	Gravataí--230kV	A	0,950	0,912	1,100	-0,038	****
964	Caxias--500kV	A	0,950	0,890	1,100	-0,060	*****
976	Gravataí--500kV	A	0,950	0,865	1,100	-0,085	*****

Índice de Severidade: 122,5

Tabela 6 - Relatório de Monitoramento de Tensão fornecido pelo ANAREDE

Fonte: Autoria Própria

Os valores registrados mostram que quatro barras do sistema apresentaram tensões abaixo do limite mínimo de 0,950 pu, caracterizando violações. As maiores quedas foram observadas nas barras 964 Caxias,500 kV e 976 Gravataí,500 kV, com tensões monitoradas de 0,890 pu e 0,865 pu, respectivamente. A severidade dessas violações foi um total de 122,5, indicando a necessidade de compensação reativa.

Já os resultados do monitoramento dos fluxos de potência na barra 976 Gravataí,500 kV, após a simulação do Caso 1651, são apresentados na Tabela 7. Foram registradas duas ocorrências associadas à mesma barra, com potências ativas superiores a 550 MW e potências reativas em torno de 260 Mvar. O carregamento observado superou os 105% em ambas as situações, indicando sobrecarga nas linhas conectadas a essa barra. As violações correspondentes de 33,9 MVA e 32,8 MVA resultaram em um índice de severidade total de 2,2.

Barra	Nome	Fluxos			Violação		Carregamento Severidade (%)
		Nc	Mw	Mvar	MVA/V	MVA	
976	Gravataí--500kV	3	552,5	259,4	705,9	33,9	105,04
976	Gravataí--500kV	1	550,4	261,8	704,8	32,8	104,88
Índice de Severidade: 2,2							

Tabela 7 - Relatório de Monitoramento de Fluxos fornecido pelo ANAREDE

Fonte: Autoria Própria

Novamente, as barras 1210; 976 e 964 se encontram na violação de tensão, porque são barras que desempenham um papel fundamental no sistema. Além das violações de tensão, o caso 1651 também apresenta violação nos fluxos pela tensão, devido à sobrecarga que foi causada pela redistribuição de potência devido à contingência, como observado na Tabela 7.

No FLUPOT, adicionando as barras que foram apresentadas pelo relatório do ANAREDE, temos o montante de potência reativa que será necessário para que o sistema volta a operar dentro dos limites operacionais aceitos.

Os valores de potência reativa alocada nas barras que apresentaram violações de tensão durante a simulação do Caso 1651 podem ser observados na Tabela 8. De onde se constata que as maiores quantidades foram destinadas às barras 1210 Gravataí,230 kV, 964 Caxias,500 kV e 976 Gravataí,500 kV, com 62,44 Mvar, 57,61 Mvar e 60,92 Mvar, respectivamente. A barra 959 Curitiba,500 kV recebeu uma compensação menor, de 18,42 Mvar. A alocação dos reativos foi essencial para corrigir os níveis de tensão e garantir que o sistema opere dentro dos limites operacionais seguros.

Barra	Nome	Mvar
959	Curitiba--500kV	18,42
1210	Gravataí--230kV	62,44
964	Caxias--500kV	57,61
976	Gravataí--500kV	60,92

Tabela 8 - Potência Reativa Alocada

Fonte: Autoria Própria

Com os valores definidos, foi possível aplicá-los no ANAREDE para avaliar sua efetividade neste cenário específico. Essa análise pode ser observada na Figura 6 e na Tabela 9. A tabela contempla três situações distintas: o caso base, o caso pós-contingência e, por fim, o caso após a aplicação da compensação reativa, apresentando os níveis de tensão correspondentes a cada condição.

A Figura 6 apresenta o diagrama unifilar do sistema-teste após a alocação de potência reativa no Caso 1651. Comparando com a condição anterior (Figura 5), observa-se que a aplicação dos reativos nas barras críticas foi eficaz na mitigação das violações de tensão. Os valores de tensão, anteriormente abaixo dos limites mínimos de emergência, foram elevados para patamares aceitáveis, especialmente nas barras 964 e 976. Além disso, a redistribuição dos fluxos de potência contribuiu para a redução do carregamento excessivo em algumas linhas. O sistema passou a operar em condições mais estáveis, evidenciando a efetividade da estratégia de compensação na recuperação da confiabilidade operacional frente à contingência simulada.

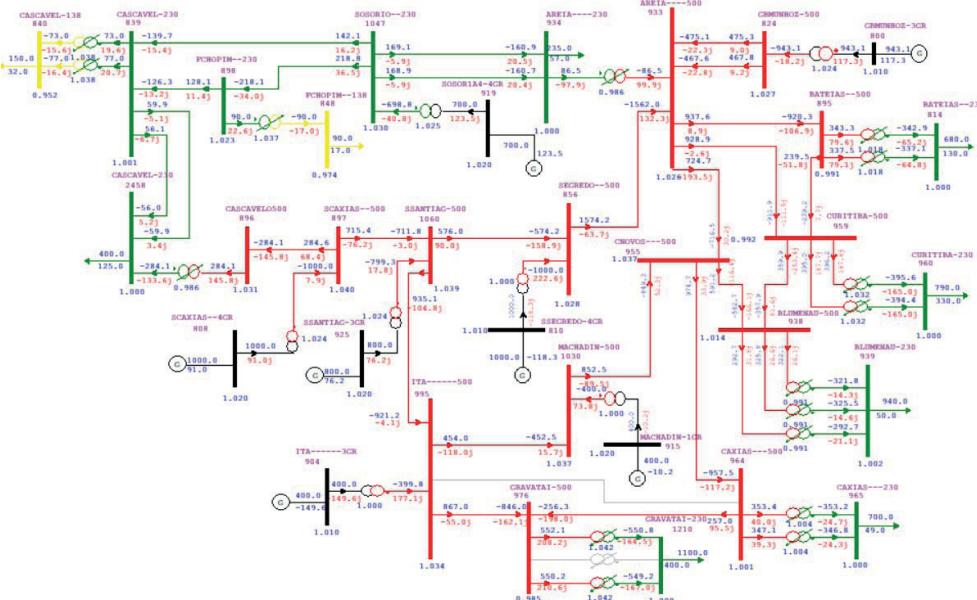


Figura 6 - Caso 1651 após a alocacão de reativos

Fonte: Autoria Própria

A Tabela 9 apresenta os valores de tensão (pu) para as barras monitoradas no Caso 1651, nos cenários de operação no caso base, após a contingência e após a alocação de reativos. Após a retirada de duas linhas de transmissão, as tensões nas barras foram reduzidas, com destaque para a barra 964 Caxias,500 kV, que passou de 1,076 pu no caso base para 0,890 pu após a contingência. Com a aplicação da compensação reativa, os valores de tensão foram restabelecidos dentro dos limites aceitáveis, atingindo 1,001 pu nessa mesma barra. Observou-se a eficácia da compensação aplicada na correção das violações de tensão e na recuperação da estabilidade do sistema.

Barra	Nome		Tensão (pu)	
		Caso base	Após contingência	Após alocação de Reativos
895	Bateias--500kV	1,022	0,950	0,991
938	Blumenau--500kV	1,053	0,964	1,014
955	Campos Novos--500kV	1,082	0,985	1,037
959	Curitiba--500kV	1,023	0,948	0,992
964	Caxias--500kV	1,076	0,890	1,001
965	Caxias--230kV	1,000	0,973	1,000
976	Gravataí--500kV	1,056	0,865	0,985
995	Itá--500kV	1,071	0,999	1,035
1210	Gravataí--230kV	1,001	0,912	1,000

Tabela 9 - Comparação da tensão para os três casos simulados

Fonte: Autoria Própria

O fluxo de potência pela tensão, também foi um problema, depois da contingência, as linhas 1 e 3 estiveram operando 104,9% e 105,0% a mais de sua capacidade nominal, que causa danos para o sistema, mas, depois da realocação de shunt reativos, o sistema voltou a trabalhar dentro dos seus valores normais, com as linhas operando em 89,0% e 89,1% respectivamente.

Análise da Curva PV - Caso 737

O Caso 737 refere-se a uma simulação de contingência do tipo N-2 no sistema-teste STB-33, com o objetivo de avaliar o impacto da retirada simultânea das linhas entre as barras 898-Foz do Chopin e 1047-Salto Osório e entre as barras 955-Campos Novos e 964-Caxias.

Nesta etapa, é apresentada a curva PV referente ao caso 737, destacando as barras contingenciadas e aquelas que apresentaram violações de tensão.

A simulação indicou uma nova margem de carregamento de 5,1244 MW e uma Margem de Segurança Térmica (MST) de 0,7748%. Segundo os critérios da ONS, valores de

MST inferiores a 4% caracterizam um sistema instável. Após a aplicação da compensação reativa, observou-se que margem de carregamento passou para 5,3098 MW e da MST para 4,42%, restabelecendo a estabilidade do sistema dentro dos parâmetros exigidos.

As curvas PV, das principais barras críticas do sistema- teste para o Caso 737, permitem a análise da estabilidade de tensão sob três condições operativas: caso base, após a contingência N-2 e após a aplicação da compensação de reativos. Tais curvas são apresentadas na Figura 7.

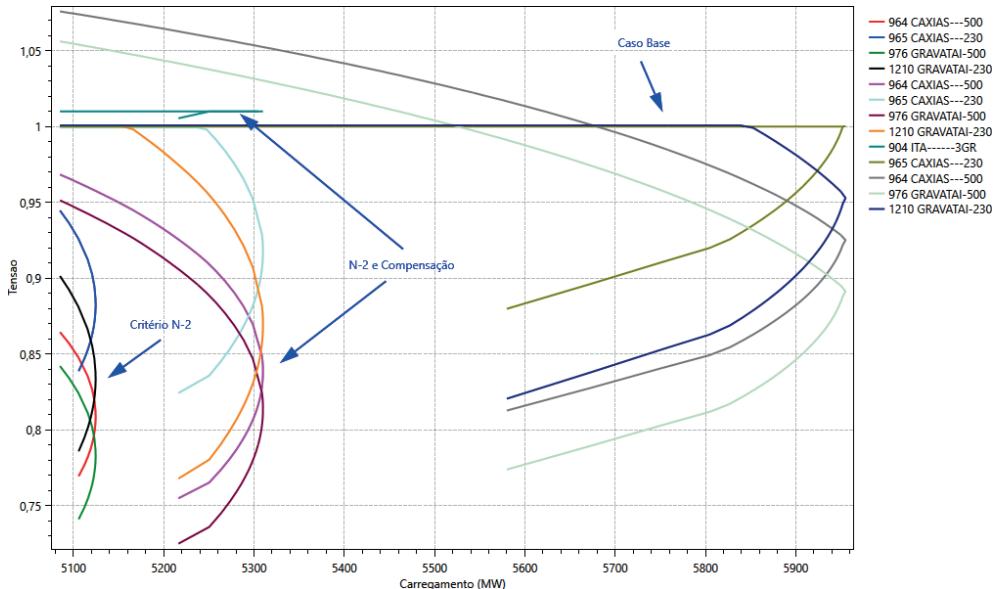


Figura 7 - Curvas correspondentes às barras críticas no caso 737

Fonte: Autoria Própria

Na condição pós-contingência, várias curvas apresentam colapsos, com quedas de tensão abaixo de 0,9 pu, mostrando um sistema instável e com margem de carregamento reduzida. Após a aplicação da compensação, há um deslocamento das curvas para a direita, indicando aumento da capacidade de carregamento e recuperação dos níveis de tensão. Essa melhora mostra a efetividade da estratégia de compensação reativa na melhora dos efeitos da contingência.

Já a Figura 8 (a seguir) apresenta as curvas PV de todas as barras críticas para o Caso 737, com as três condições operativas analisadas: caso base, após a contingência N-2 e após a aplicação da compensação de reativos. Nessa figura é possível obter uma visualização comparativa direta entre os cenários.

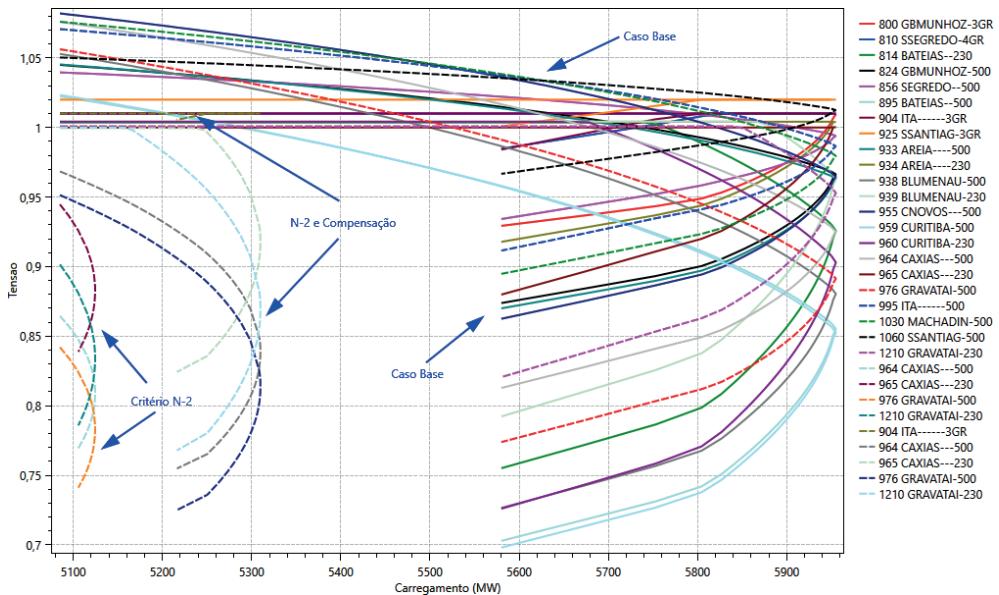


Figura 8 - Curvas PVs para o caso 737 nos três casos simulados

Fonte: Autoria Própria

Após a contingência, as curvas se deslocam para a esquerda, indicando uma redução da margem de carregamento e quedas nos níveis de tensão. Com a aplicação da compensação reativa, as curvas voltam a se aproximar daquelas do caso base, mostrando que houve a recuperação da estabilidade do sistema e o aumento da capacidade de carregamento.

Os valores da Margem de carregamento para os três casos que foram analisados anteriormente, caso base, após a contingência e após a contingência e a compensação são apresentados na Tabela 10.

Barra	Nome	Tensão (kV)	Caso Base	Critério N-2	Critério N-2 e Contingência
904	Itá	13,8	1,010	-	1,010
964	Caxias	500	0,925	0,807	0,841
965	Caxias	230	1,000	0,894	0,925
976	Gravataí	500	0,891	0,786	0,816
1210	Gravataí	230	0,953	0,837	0,877

Tabela 10 - Tensão PMC no caso base, após a contingência e compensação do caso 737

Fonte: Autoria Própria

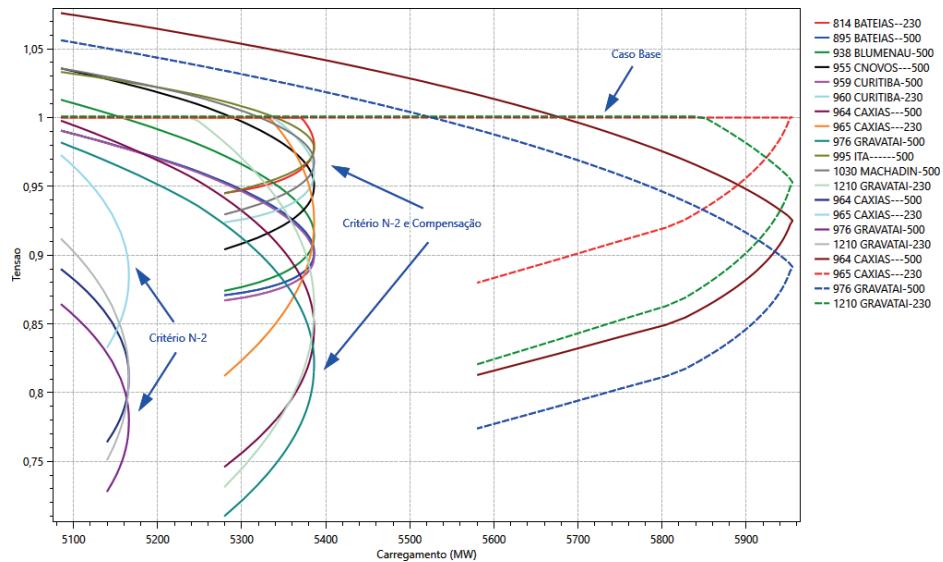
Mesmo depois da compensação, tirando a barra 904, nenhuma outra conseguiu voltar ao seu valor do caso base e nem alcançar os valores mínimos aceitáveis (mostrados na Tabela 1), devido ao fato de que essas barras estão em um ponto importante da área A, onde há um grande volume carga sendo demandado, e a corrente elétrica na linha aumenta bastante, provocando uma maior queda de tensão no barramento diminuindo além do aceitável.

Análise da Curva PV - Caso 1651

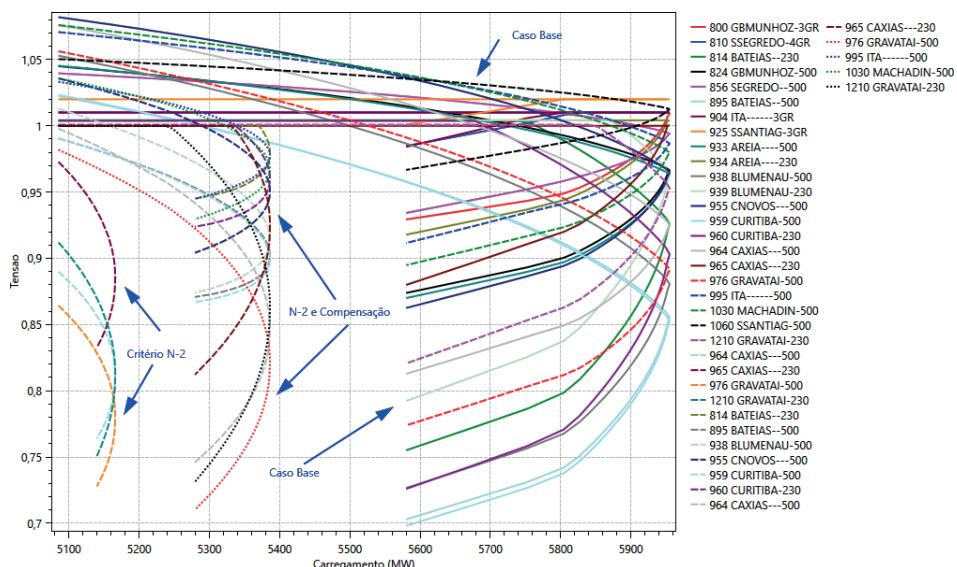
No caso 1651 a contingência do tipo N-2 no sistema-teste STB-33, teve como objetivo avaliar os efeitos da retirada simultânea de duas linhas de transmissão entre as barras 995-Itá e 964-Caxias e entre as barras 1210-Gravataí-230 e 976-Gravataí.

O caso 1651 possui uma margem de carregamento de 5,1658 MW e uma Margem de Segurança Térmica de 1,59%, valor inferior ao limite mínimo de 4% estabelecido pela ONS. O trabalho busca verificar se a aplicação da compensação reativa é capaz de recuperar a operação segura do sistema e restabelecer os níveis de tensão dentro dos parâmetros aceitáveis.

As curvas PV das principais barras críticas do sistema-teste para o Caso 1651 são apresentadas na Figura 9, permitindo comparar as condições operativas do sistema nos três cenários: caso base, após a contingência N-2 e após a aplicação da compensação reativa. Foi possível observar que, após a retirada de duas linhas de transmissão, diversas barras apresentaram valores de tensão baixos, indicando uma redução da margem de carregamento e queda nos níveis de tensão. Com a aplicação da compensação, houve um deslocamento das curvas para a direita e os níveis de tensão se elevaram, aproximando-se das condições do caso base.



Já a Figura 10 mostra as curvas PV para o Caso 1651 em um único gráfico. Após a contingência, diversas curvas tiveram seus níveis de tensão inferiores a 0,9 pu, mostrando a instabilidade do sistema. A alocação e reativos provocou um deslocamento dessas curvas para a direita, com elevação nos níveis de tensão e ampliação da margem de carregamento, fazendo com que houvesse o restabelecimento da operação segura em várias barras do sistema.



Após aplicada a compensação, foi possível notar uma melhora nos parâmetros, tendo o PMC de 5,3860MW e a MST de 5,91%, ou seja, quando foi realizado a alocação de reativos, o sistema operou acima do mínimo tolerável, porém, analisando a Tabela 11 (a seguir), é possível observar que nem todos os pontos críticos foram melhorados, isso se deve por conta do incremento de carga, como ocorreu nos casos anteriores.

A Tabela 11 apresenta os valores de tensão no ponto de máxima carga para as barras do sistema no Caso 1651, considerando as condições do caso base, após a aplicação do critério N-2 e após a compensação reativa. Notou-se que, após a contingência, várias barras apresentaram quedas nos níveis de tensão. Após a aplicação da compensação, houve recuperação dos níveis de tensão, elevando os valores da tensão. Esses resultados mostram que houve um acerto na compensação reativa, ainda que algumas barras permaneçam operando em condições próximas ao limite de estabilidade.

Barra	Nome	Tensão (kV)	Caso Base	Critério N-2	Critério N-2 e Contingência
814	Bateias	230	0,926	-	0,981
895	Bateias	500	0,855	-	0,903
904	Itá	13,8	1,010	1,010	1,010
955	Campos Novos	500	0,965	-	0,951
938	Blumenau	500	0,880	-	0,913
959	Curitiba	500	0,853	-	0,898
960	Curitiba	230	0,903	-	0,959
964	Caxias	500	0,925	0,811	0,845
965	Caxias	230	1,000	0,885	0,927
976	Gravataí	500	0,891	0,7801	0,819
995	Itá	500	0,987	-	0,976
1030	Machadinho	500	0,980	-	0,968
1210	Gravataí	230	0,953	0,812	0,865

Tabela 11 - Tensão PMC no caso base, após a contingência e compensação do caso 1651

Fonte: Autoria Própria

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Quando ocorre uma contingência, como a perda de linhas de transmissão, a estabilidade de tensão do sistema pode ser comprometida, colocando em risco a operação segura da rede elétrica. Por esse motivo, analisar contingências de critérios N-2, nas quais duas linhas de transmissão são desligadas simultaneamente, torna-se essencial para garantir que o sistema possa operar de forma confiável mesmo diante de eventos severos. Assim, identificar o quanto antes os pontos mais vulneráveis da rede e propor melhorias é fundamental para evitar falhas e garantir a confiabilidade do sistema.

Desta forma, o trabalho teve como objetivo a análise de contingências de critério N-2 em linhas de transmissão do sistema-teste STB-33, a fim de verificar a estabilidade do sistema diante da retirada simultânea de dois componentes e avaliar a eficácia da compensação paralela de reativos. Esse tipo de contingência é especialmente crítico por colocar em risco a entrega de energia elétrica e comprometer a confiabilidade do sistema.

Foram simuladas ao todo, 2.465 casos de desligamentos de duas linhas de transmissão, desses, apenas 1.104 casos apresentaram convergência no software ANAREDE. Para análise, foram escolhidos os casos 737 e 1651 por estarem localizados em áreas estratégicas, como interligações entre subsistemas e pontos de grandes cargas, e por possuírem níveis de severidade distintos, caracterizado pela magnitude da violação dos limites de tensão.

A maioria dos casos que não convergiram pertenciam a Área A, região com grande volume de intercâmbio de potência, o que dificulta a resolução das equações de fluxo de potência, levando a não convergência. Entre os casos, 587 apresentaram ilhamento, fazendo com que uma parte do sistema ficasse isolada do restante, e, não sendo possível calcular o fluxo de potência. Por fim, foram também descartados casos da Área B que, apesar de terem收敛ido, não apresentaram violações de tensão ou fluxo de potência.

Com o auxílio do programa FLUPOT, foram analisados os quatro casos selecionados, 737, 1376, 1651 e 2303, com o objetivo de aplicar compensação paralela de reativos e reduzir as violações de tensão após as contingências de critério N-2. Por meio do software, foi possível determinar a quantidade de reativos que seriam alocados para recuperar os níveis de tensão das barras críticas, aquelas que apresentaram valores de tensão inferiores ao limite mínimo que é definido pela ONS. No total, foram compensadas 8 barras principais e observou-se que, em todos os casos, houve também melhora nas tensões de barramentos vizinhos, especialmente nas barras 965 e 976.

Para analisar a margem de carregamento do sistema diante às contingências, foram geradas as curvas PV por meio do método de Fluxo de Potência Continuado no programa ANAREDE. Essa análise permitiu avaliar o comportamento das tensões à medida que houve um incremento de carga de 0,2. No caso base, antes da ocorrência das contingências, foi identificado que algumas barras estavam próximas de se tornarem críticas, com tensões perto dos limites mínimos operacionais, indicando que essas barras já operavam próximas ao seu ponto máximo, mostrando quais regiões do sistema estavam mais vulneráveis, mesmo sem algum evento crítico.

A geração e análise das curvas PV foi de extrema importância para os estudos realizados, pois foi possível observar a estabilidade de tensão nas diferentes situações simuladas: caso base, pós-contingência N-2 e após a compensação. Essas curvas tornaram possível determinar a Margem de Estabilidade de Tensão (MST) de cada caso, identificar o PMC (Ponto de Máxima Carga) e verificar se a alocação de reativos para a recuperação do sistema foi satisfatória.

Após a realização da compensação de reativos paralela e da análise dos valores de PMC e MST, observou-se que todos os quatro casos estudados apresentaram resultados melhores. Em todos eles, os valores de MST ficaram acima do limite mínimo de 4% estabelecido pelo ONS, mostrando que houve a recuperação da estabilidade de tensão do sistema após as contingências. Para isso, foram alocados reativos nas barras críticas, sendo, 127,52 Mvar no caso 737 e 199,39 Mvar no caso 1651. Esses valores foram distribuídos em diferentes barras, conforme a severidade das violações observadas.

Dessa forma, conclui-se que a metodologia de alocação de compensação de reativos paralela se demonstrou eficaz para melhorar os efeitos das contingências duplas, restabelecendo a estabilidade de tensão do sistema em todos os casos simulados.

REFERÊNCIAS

- ALENCAR, Marina Valença. **REFORMULAÇÃO DAS RESTRIÇÕES DE COMPLEMENTARIDADE EM PROBLEMAS DE FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO**. 2019. Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica) - Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual Paulista, 2019.
- ALVES, Guilherme de Oliveira. **Inclusão do Modelo do Regulador de Velocidade nos Problemas de Fluxo de Potência e Fluxo de Potência Ótimo com Abordagem Trifásica**. 2021. Tese (Doutor em Engenharia Elétrica) - Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora, 2021.
- ALVES, Waschington Fernandes. **Proposição de Sistemas teste Para Análise Computacional de Sistemas de Potência**. 2007. Dissertação (Mestrado em Computação) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2007.
- BARBOSA, João Pedro Peters; FILHO, João Alberto Passos. Avaliação e Aprimoramento de Metodologias para Representação de CER no Problema de Fluxo de Potência. **IX Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**, 2022.
- BEORDO, Lucas. **Planejamento da Operação de controles de reativo e tensão considerando restrições de estabilidade de tensão**. 2018. Dissertação (Mestre em Ciências) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2018.
- BRITO, Marcio Evaristo da Cruz. **Dispositivos de Compensação de Energia Reativa e Controle da Tensão para Redução de Perdas Técnicas em Sistemas de Distribuição**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Pós Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, 2015.
- CANTARINO, Marcelo. **Análise de Sensibilidade da Margem de Carregamento em Sistemas Elétricos de Potência: Um Estudo Comparativo**. 2007. Dissertação (Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA, 2007.
- CENTRO DE PESQUISA DE ENERGIA ELÉTRICA. **Programa de Análise de Redes:** manual do usuário. Rio de Janeiro: CEPEL, 2011.

CONDENGA, Sandro Yohasner Chavarria. **Metodologia para Determinação da Margem de Estabilidade de Tensão Sob a Perspectiva da Expansão e da Operação de Sistemas de Potência.** 2013. Tese (Mestre em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2013.

COSTA, Tito Ricardo. **Faixas de segurança de linhas de transmissão e seu modelo de desempenho frente aos incêndios florestais.** 2021. Tese (Doutorado em ciências florestais) - Faculdade de tecnologia, Universidade de Brasília, 2021.

DELGADO, T. M. S. **Análises de estabilidade de tensão em sistemas elétricos de potência utilizando o ANAREDE.** 2019. TCC (Graduação em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, Paulo Afonso, 2019.

DIAS, Amanda Alvarenga. **Critério Para Determinação da Margem de Estabilidade de Tensão sob a Perspectiva da Operação.** 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Pós graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio, 2020.

JABUINSKI, Monalisa Tavares. **Análise De Contingências No Sistema Elétrico De Potência Nos Cenários De Cargas Zip.** 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2021.

JÚNIOR, Ariôsto Sales de Melo. **Análise de Contingências com Critério N-1 em Sistemas Elétricos de Potência Utilizando o ANAREDE®.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande, 2019.

LAGE, Guilherme Guimarães. O Fluxo de Potência Ótimo Reativo com Variáveis de Controle Discretas e Restrições de Atuação de Dispositivos de Controle de Tensão. 2013. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2013.

LIMA, Glaucus Rivera Santos. **Alocação de TCSC em Linhas de Transmissão Congestionadas como Forma de se Garantir o Fluxo de Potência Ótimo com Restrição de Segurança em Condição de Contingências N-1.** 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas, Universidade Federal de Ouro Preto, 2020.

LOBO, F. X. **IMPACTO ELÉTRICO DA INSERÇÃO DE UMA CENTRAL FOTOVOLTAICA NA REDE DE TRANSMISSÃO: estudo de caso Usina Solar Coremas-PB.** Dissertação - Programa de Pós-graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares da Universidade Federal de Pernambuco, 2022.

MENEZES, Taciana de Vasconcelos. **MELHORIA DA MARGEM DE ESTABILIDADE DE TENSÃO NO PRÉ-DESPACHO DA OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA VIA OTIMIZAÇÃO DE REATIVOS.** 2002. Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Campinas, 2002.

MONTICELLI, A. J.; GARCIA, A. Introdução a sistemas de energia elétrica. [S.I.]: Ed Unicamp, 1999.

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

OLIVEIRA, Eduardo. **Análise Estática de Contingências do Sistema de Transmissão de 230 kV do Acre/Rondônia.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Eletrônica) – Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

OLIVEIRA, Wmerson Claro. **Fluxo De Potência Ótimo Probabilístico Com Fontes De Geração Renováveis - Abordagem Através De Técnica De Otimização Matheurística**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha Solteira – UNESP, 2020.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Submódulo 23.3: diretrizes e critérios para estudos elétricos**. Rio de Janeiro: ONS, 2018.

PATACA, L. C. **Analise de Contingencia com Critério N-1 em Sistemas Elétricos de Potência utilizando Computação Paralela em MATLAB**. Trabalho de Conclusão de Curso - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2012.

PINTO, Danilo Pereira; PEREIRA, J.L.R. SBA Controle & Automação. **UM MÉTODO LOCALIZADO PARA ANÁLISE DE CONTINGÊNCIAS ESTÁTICAS EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA**, 1995.

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.

ROCHA, Marcel. **ESTUDOS DE COLAPSO DE TENSÃO ATRAVÉS DE DETERMINAÇÃO DE AÇÕES DE CONTROLE COM AUXÍLIO DO AUTOVETOR À ESQUERDA**. 2009. Dissertação (Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Itajubá, 2009.

SAADAT, Hadi. **Power system analysis**. Ed. McGrawHill do Brasil, LTDA, 1999

SILVA, Diego Nunes. **Novas Abordagens Determinísticas de Otimização para Resolução do Problema de Fluxo de Potência Ótimo**. 2019. (Tese) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2019.

SOUZA, Thales. **Estudos de Planejamento de Reativos em Sistemas Elétricos de Potência**. 2003. Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003.

SOUZA, Rafael Ramos. **Programação do despacho termo-eólico por fluxo de potência ótimo ativo/reactivo solucionado por métodos de pontos interiores/exteriores**. 2020. Tese (Doutor em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia de Bauru da Universidade Estadual Paulista, 2020.

STEVENSON, William D. **Power system analysis**. Ed. McGrawHill do Brasil, LTDA, 1986.

VALE, M.H.M; CHAVES, F.S.; SILVA, B.A.C.; MARIANO JR., L.; VALADARES, J.R. **Critérios e Procedimentos para Compensação Reativa e Controle de Tensão**. XVI - SNPTEE, 2001.

YOHASNER CHAVARRIA CONDEGA, Sandro. **Metodologia para determinação da margem de estabilidade de tensão sob a perspectiva da expansão e da operação de sistemas de potência**. 2013. Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Minas Gerais, 2013.

ZEFERINO, C. L. **Avaliação e controle da margem de carregamento em sistemas elétricos de potência**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011