

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
JOÃO MARCOS FILORDI VARGAS

**APLICAÇÃO DE AÇÕES DE CONTROLE PARA ESTABELEECER O AUMENTO
DA MARGEM DE CARGA DE CURVAS PV'S**

FORMIGA – MG

2016

JOÃO MARCOS FILORDI VARGAS

**APLICAÇÃO DE AÇÕES DE CONTROLE PARA ESTABELEECER O AUMENTO
DA MARGEM DE CARGA DE CURVAS PV'S**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica do IFMG-Formiga, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Renan Souza Moura

FORMIGA – MG

2016

621.3
V297a

Vargas, João Marcos Filordi

Aplicações de ações de controle para estabelecer o aumento da margem de carga de curvas PV's/ João Marcos Filordi Vargas Formiga :: IFMG, 2016.

72p. : il.

Orientador: Dr. Renan Souza Moura

Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal de Minas – *Campus* Formiga.

1.Sistemas elétricos - potência. 2.Margem - Carga. 3. Curvas PV's. I. Título.

CDD 621.3

JOÃO MARCOS FILORDI VARGAS

**APLICAÇÃO DE AÇÕES DE CONTROLE PARA ESTABELECE O AUMENTO
DA MARGEM DE CARGA DE CURVAS PV'S**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Engenharia
Elétrica do Instituto Federal de Minas
Gerais como requisito para obtenção do
título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Avaliado em: ___ de _____ de _____.

Nota: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Renan Souza Moura - Orientador

Prof. Marco Antônio Silva Pereira - Membro

Prof. Guilherme Barbosa Lima - Membro

Dedico este trabalho aos meus pais, minha namorada e demais familiares. Sou-lhes grato pelo apoio, carinho e dedicação me fazendo alcançar mais esta conquista.

RESUMO

Com o aumento da demanda energética, os Sistemas Elétricos de Potência (SEP'S) têm operado cada vez mais próximos dos seus limites de transmissão de potência. O estudo do funcionamento destes sistemas se justifica de modo a assegurar que tanto sua operação quanto planejamento ocorram de maneira correta e segura, garantindo que seus parâmetros estejam dentro dos valores permitidos, ou seja, em operação normal, sobrecarga ou com a ocorrência de transitórios ou distúrbios. Dentro deste contexto, a margem de carga desempenha um fator fundamental porque indica o quanto próximo um ponto operativo está do seu máximo carregamento do sistema analisado. Uma vez obtidas curvas PV's de vários sistemas, ações de controle são introduzidas com a finalidade de verificar suas influências. Testes são efetuados nos sistemas com 3, 6, 9, 14, 30, 57 e 118 barramentos.

Palavras-chave: Sistemas Elétricos de Potência; Margem de carga; Curvas PV's.

ABSTRACT

With increasing energy demand, the Electric Power System (EPS) has operated closer to their transmission power limits. The study of the operation of these systems is justified to ensure that both operation and planning occur properly and safely, ensuring that their parameters are within the allowable values, that is in normal operation, overcharging or the result of transient or disorders. In this context, the load margin plays a critical factor because it indicates how an operating point is close to its maximum loading of the analyzed system. Once obtained PV curves of various systems, control measures are introduced in order to verify their influence on the curves. Tests are conducted in systems with 3, 6, 9, 14, 30, 57 and 118 buses.

Keywords: Electrical Power Systems; Charge; Curves PV'S.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo de linha de transmissão.	19
Figura 2 - Modelo de transformador em fase.	20
Figura 3 - Modelo de transformador defasador.	20
Figura 4 - Fluxograma do método de Newton-Raphson.	23
Figura 5 - Curva PV 25	25
Figura 6 - Identificação da Margem de carga (MET) sobre uma Curva PV 26	26
Figura 7 - Margem de Estabilidade de Tensão segundo o WECC 27	27
Figura 8 - Fluxograma para criação do Fluxo de Potência continuado. 29	29
Figura 9 - Sistema de 3 barras. 30	30
Figura 10 - Curva PV para o sistema de 3 barras. 30	30
Figura 11 - Sistema de 6 barras. 31	31
Figura 12 - Curva PV para o sistema de 6 barras. 31	31
Figura 13 - Sistema de 9 barras. 32	32
Figura 14 - Curva PV para o sistema de 9 barras. 32	32
Figura 15 - Sistema de 14 barras. 33	33
Figura 16 - Curva PV para o sistema de 14 barras. 33	33
Figura 17 - Sistema de 30 barras. 34	34
Figura 18 - Curva PV para o sistema de 30 barras. 34	34
Figura 19 - Sistema de 57 barras. 35	35
Figura 20 - Curva PV para o sistema de 57 barras. 35	35
Figura 21 - Sistema de 118 barras. 36	36
Figura 22 - Curva PV para o sistema de 118 barras. 36	36
Figura 23 - Ponto crítico de tensão para o sistema de 3 barras. 38	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Níveis de Desempenho de Estabilidade de Carga segundo WECC.....	27
Tabela 2 - Margem de carga com inserção de linhas de transmissão no Sistema de 3 Barras.....	37
Tabela 3 - Margem de carga com inserção de linhas de transmissão no Sistema de 3 Barras.....	41
Tabela 4 - Margem de carga com inserção de linhas de transmissão no Sistema de 6 Barras.....	41
Tabela 5 - Margem de carga com a inserção de linhas de transmissão no Sistema de 9 Barras.....	42
Tabela 6 - Margem de carga com inserção de linhas de transmissão no Sistema de 14 Barras.....	42
Tabela 7 - Margem de carga com inserção de linhas de transmissão no sistema de 30 Barras.....	43
Tabela 8 - Margem de carga com inserção de linhas de transmissão no Sistema de 57 Barras.....	43
Tabela 9 - Margem de carga com inserção de linhas de transmissão no Sistema de 118 Barras.....	44
Tabela 10 - Margem de carga com inserção de capacitor no Sistema de 3 Barras.....	44
Tabela 11 - Margem de carga com inserção de capacitor no Sistema de 6 Barras.....	45
Tabela 12 - Margem de carga com inserção de capacitor no Sistema de 9 Barras.....	46
Tabela 13 - Valores de tensão nas barras.....	46
Tabela 14 - Valor de tensão nas barras.....	47
Tabela 15 - Margem de carga com inserção de capacitor no Sistema de 14 Barras.....	47
Tabela 16 - Margem de carga com a inserção de capacitor no Sistema de 30 Barras.....	48
Tabela 17 - Margem de carga com inserção de capacitor no Sistema de 57 Barras.....	48
Tabela 18 - Margem de carga com inserção de capacitor no Sistema de 118 Barras.....	49
Tabela 19 - Margem de carga com variação de tensão dos geradores no Sistema de 3 Barras.....	49
Tabela 20 - Margem de carga com variação de tensão dos geradores no Sistema de 6 Barras.....	50
Tabela 21 - Margem de carga com variação de tensão dos geradores no Sistema de 9 Barras.....	51
Tabela 22 - Margem de carga com variação de tensão dos geradores no Sistema de 14 Barras.....	51
Tabela 23 - Margem de carga com variação de tensão dos geradores no Sistema de 30 Barras.....	52
Tabela 24 - Margem de carga com variação de tensão dos geradores no Sistema de 57 Barras.....	52
Tabela 25 - Margem de carga com variação de tensão dos geradores no Sistema de 118 Barras.....	53
Tabela 26 - Margem de carga com inserção de linhas e capacitor no Sistema de 3 Barras.....	54
Tabela 27 - Margem de carga com inserção de linhas e capacitor no Sistema de 6 Barras.....	55
Tabela 28 - Margem de carga com inserção de linhas e capacitor no Sistema de 9 Barras.....	55
Tabela 29 - Margem de carga com inserção de linhas e capacitor no Sistema de 14 Barras.....	56
Tabela 30 - Margem de carga com inserção de linhas e capacitor no Sistema de 30 Barras.....	56
Tabela 31 - Margem de carga com inserção de linhas e capacitor no Sistema de 57 Barras.....	57
Tabela 32 - Margem de carga com inserção de linhas e capacitor no Sistema de 118 Barras.....	57
Tabela 33 - Margem de carga com variação de tensão dos geradores e inserção de capacitor no Sistema de 3 Barras.....	58
Tabela 34 - Margem de carga com variação de tensão dos geradores e inserção de capacitor no Sistema de 6 Barras.....	59
Tabela 35 - Margem de carga com variação de tensão dos geradores e inserção de capacitor no Sistema de 9 Barras.....	59
Tabela 36 - Margem de carga com variação de tensão dos geradores e inserção de capacitor no Sistema de 14 Barras.....	60
Tabela 37 - Margem de carga com variação de tensão dos geradores e inserção de capacitor no Sistema de 30 Barras.....	60

Tabela 38 - Margem de carga com variação de tensão dos geradores e inserção de capacitor no Sistema de 57 Barras.....	61
Tabela 39 - Margem de carga com variação de tensão dos geradores e inserção de capacitor no Sistema de 118 Barras.....	61
Tabela 40 - Margem de carga com aplicação das três técnicas no Sistema de 3 Barras	62
Tabela 41 - Margem de carga com aplicação das três técnicas no Sistema de 6 Barras	62
Tabela 42 - Margem de carga com aplicação das três técnicas no Sistema de 9 Barras	63
Tabela 43 - Margem de carga com aplicação das três técnicas no Sistema de 14 Barras	63
Tabela 44 - Margem de carga com aplicação das três técnicas no Sistema de 30 Barras	63
Tabela 45 - Margem de carga com aplicação das três técnicas no Sistema de 57 Barras	64
Tabela 46 - Margem de carga com aplicação das três técnicas no Sistema de 118 Barras	64

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.2 JUSTIFICATIVA	11
1.3 OBJETIVO	12
1.4 METODOLOGIA.....	12
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO	12
2. FLUXO DE POTÊNCIA	14
2.1 EVOLUÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA	14
2.2 ESTUDOS DEPENDENTES DO FLUXO DE POTÊNCIA.....	15
2.3 FORMULAÇÃO BÁSICA	16
2.4 MODELAGEM DO SISTEMA	18
2.4.1 LINHAS DE TRANSMISSÃO	18
2.4.2 TRANSFORMADOR EM FASE	19
2.4.3 TRANSFORMADOR DEFASADOR.....	20
2.5 EXPRESSÕES GERAIS DOS FLUXOS DE POTÊNCIAS.....	21
2.6 MÉTODO DE <i>NEWTON-RAPHSON</i> NA SOLUÇÃO DE FLUXO DE POTÊNCIA.....	21
2.7 ESTABILIDADE.....	23
2.8 CURVAS PV	24
2.9 MARGEM DE CARGA	26
3. METODOLOGIA.....	28
3.1 INTRODUÇÃO	28
3.2 DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO	28
3.3 FLUXO DE POTÊNCIA CONTINUADO PARA OS SISTEMA	29
3.3.1 SISTEMA DE 3 BARRAS	29
3.3.2 SISTEMA DE 6 BARRAS	30
3.3.3 SISTEMA DE 9 BARRAS	31
3.3.4 SISTEMA DE 14 BARRAS	32
3.3.5 SISTEMA DE 30 BARRAS	33
3.3.6 SISTEMA DE 57 BARRAS	34
3.3.7 SISTEMA DE 118 BARRAS	36
3.3.8 MARGEM DE CARGA DOS SISTEMAS.....	37
3.4 AÇÕES DE CONTROLE	37

3.4.1 INSERÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO NO SISTEMA.....	37
3.4.2 INSERÇÃO DE CAPACITOR SHUNT NO SISTEMA.....	38
3.4.3 VARIAÇÃO DE TENSÃO DOS GERADORES DOS SISTEMAS.....	39
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	41
4.1 INSERÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO	41
4.1.1 SISTEMA DE 3 BARRAS	41
4.1.2 SISTEMA DE 6 BARRAS	41
4.1.3 SISTEMA DE 9 BARRAS	42
4.1.4 SISTEMA DE 14 BARRAS	42
4.1.5 SISTEMA DE 30 BARRAS	42
4.1.6 SISTEMA DE 57 BARRAS	43
4.1.7 SISTEMA DE 118 BARRAS	43
4.2 INSERÇÃO DE CAPACITOR SHUNT.....	44
4.2.1 SISTEMA DE 3 BARRAS	44
4.2.2 SISTEMA DE 6 BARRAS	45
4.2.3 SISTEMA DE 9 BARRAS	46
4.2.4 SISTEMA DE 14 BARRAS	47
4.2.5 SISTEMA DE 30 BARRAS	48
4.2.6 SISTEMA DE 57 BARRAS	48
4.2.7 SISTEMA DE 118 BARRAS	48
4.3 AUMENTO DE TENSÃO DOS GERADORES	49
4.3.1 SISTEMA DE 3 BARRAS	49
4.3.2 SISTEMA DE 6 BARRAS	50
4.3.3 SISTEMA DE 9 BARRAS	51
4.3.4 SISTEMA DE 14 BARRAS	51
4.3.5 SISTEMA DE 30 BARRAS	52
4.3.6 SISTEMA DE 57 BARRAS	52
4.3.7 SISTEMA DE 118 BARRAS	53
4.4 JUNÇÃO DAS TÉCNICAS DE AUMENTO DA MARGEM DE CARGA.....	53
4.5 INSERÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO JUNTAMENTE COM A INSERÇÃO DE UM CAPACITOR SHUNT.	54
4.5.1 TÉCNICA APLICADA NO SISTEMA DE 3 BARRAS	54
4.5.2 TÉCNICA APLICADA NO SISTEMA DE 6 BARRAS	55
4.5.3 TÉCNICA APLICADA NO SISTEMA DE 9 BARRAS	55

4.5.4 TÉCNICA APLICADA NO SISTEMA DE 14 BARRAS	56
4.5.5 TÉCNICA APLICADA NO SISTEMA DE 30 BARRAS	56
4.5.6 TÉCNICA APLICADA NO SISTEMA DE 57 BARRAS	57
4.5.7 TÉCNICA APLICADA NO SISTEMA DE 118 BARRAS	57
4.6 AUMENTO DA TENSÃO DOS GERADORES E INSERÇÃO DE CAPACITOR SHUNT	58
4.6.1 TÉCNICA APLICADA NO SISTEMA DE 3 BARRAS	58
4.6.2 TÉCNICA APLICADA NO SISTEMA DE 6 BARRAS	58
4.6.3 TÉCNICA APLICADA NO SISTEMA DE 9 BARRAS	59
4.6.4 TÉCNICA APLICADA NO SISTEMA DE 14 BARRAS	59
4.6.5 TÉCNICA APLICADA NO SISTEMA DE 30 BARRAS	60
4.6.6 TÉCNICA APLICADA NO SISTEMA DE 57 BARRAS	60
4.6.7 TÉCNICA APLICADA NO SISTEMA DE 118 BARRAS	61
4.7 AUMENTO DA TENSÃO DOS GERADORES, INSERÇÃO DE CAPACITORES SHUNT E INSERÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO	61
5. CONCLUSÃO	65
6. TRABALHOS FUTUROS.....	67
7. REFERÊNCIAS	68

1. INTRODUÇÃO

Desde a revolução industrial, a demanda e o consumo de energia crescem continuamente. O homem moderno está habituado com o fornecimento contínuo de energia para suprir diversas necessidades. Entretanto, devido a sua complexidade, o contínuo aumento da população, da indústria, e, portanto, da demanda de energia, tem levado estes sistemas a operarem próximos dos seus limites e, por vezes, em situações de emergência que podem ameaçar o fornecimento contínuo de energia. Em casos mais severos, diferentes sistemas de potência têm experimentado blecautes nas últimas décadas e a frequência destes eventos tem aumentado notavelmente. Esses apagões podem ser originados pela queda progressiva das tensões em todo o sistema ou em grande parte do mesmo, e podem ser ocasionadas pela entrada ou saída de diferentes elementos do sistema ou pelo contínuo aumento da carga sem o correspondente acréscimo da geração (BEDOYA, 2007).

Para garantir que o fornecimento de energia aconteça de maneira satisfatória é necessário o estudo de ferramentas habilitadas a nortear a operação e planejamento do sistema, garantindo assim sua segurança. Dentre essas ferramentas se tem o fluxo de potência como uma das principais utilizadas. Além disso, a análise de estabilidade do sistema vem, ao longo do tempo, ganhando também um grande destaque. Este interesse é uma consequência direta do crescimento contínuo da demanda que, associado às restrições econômicas e ambientais, e à desregulamentação do setor elétrico, tem levado os sistemas elétricos a operar próximo de seus limites operacionais.

Uma das maneiras de observar o funcionamento do sistema é com a obtenção do perfil de tensão das barras em função do seu carregamento, onde estes dados são obtidos através de sucessivas soluções de fluxo de potência. Este método é realizado através do fluxo de potência continuado, que se dá pela variação incremental do carregamento do sistema (MESQUITA, 2007). Este procedimento resulta na plotagem das curvas PV's, onde estas possibilitam compreender as condições de operação dos sistemas para diferentes carregamentos, sendo recomendadas pelas empresas do setor elétrico internacional (WSCC, 1998) e nacional (MIKILITA, 2005), para a avaliação da estabilidade de tensão. Dentre outras aplicações, estes perfis são utilizados para observar o comportamento das tensões das barras do sistema e obter sua margem de carga (ponto de máximo carregamento). Sua obtenção é de suma importância para o cálculo de margens de estabilidade, uma vez que é neste ponto que ela fornece informações para se determinar medidas efetivas para o reforço do sistema, dado

que a margem de carga define a fronteira entre as regiões de operação estável e instável.

No intuito de aumentar a margem de carga dos sistemas, várias pesquisas têm sido desenvolvidas com o objetivo de se criar mecanismos para serem inseridos nos sistemas e desempenhar este papel. Entretanto, sabe-se que o fluxo de energia entre as barras do sistema sofre mudanças de direção em qualquer instante caso a configuração da rede sofra alterações, seja em consequência de contingências de linhas de transmissão, de manobras em transformadores ou ainda quando estes são retirados do sistema para manutenção ou substituição. Estes fluxos também mudarão devido a variações na geração ou conforme a solicitação de carga, isto é, alteração no carregamento do sistema (PAIVA, 2007).

O aumento no fluxo de potência tem como consequência direta o acréscimo das perdas ativas e reativas nas linhas de transmissão. As impedâncias dos equipamentos de rede, tais como geradores, transformadores e linhas de transmissão, provocam não só perdas de potência ativa e reativa, como também queda de tensão nestes elementos. Assim, a inserção de elementos na rede pode gerar mudanças no fluxo de potência passíveis de levar o sistema a um perfil de tensão desfavorável e com valores de perdas maiores. Com isso constata-se que um elemento inserido com a função de trazer um benefício para o sistema pode terminar por trazer maiores danos que proveitos (MALANGE, 2016).

Sendo assim, uma das tarefas dos engenheiros e pesquisadores em sistemas de potência, é o estudo e desenvolvimento de ferramentas computacionais que examinem a influência de diversos equipamentos quando inseridos nos sistemas elétricos de potência, através da modelagem do sistema, considerando as diretrizes energéticas estabelecidas, os limites operativos e os critérios estipulados para o mesmo.

1.2 JUSTIFICATIVA

Há uma grande necessidade de se desenvolver técnicas para aumentar a margem de carga dos sistemas sem que grandes gastos sejam necessários e, principalmente, que estas cumpram com o que lhes é esperado. Existe na literatura estudos sobre estas técnicas, porém, é difícil mensurar qual será o verdadeiro impacto que estas causarão nos sistemas, além disso, não se pode prever que a aplicação de mais de uma dessas técnicas em um mesmo sistema trará uma resposta positiva. Desta forma, o desenvolvimento de um programa para realizar a simulação destas ações de controle seria de muita utilidade, permitindo que as concessionárias e os operadores do sistema possam, através do conhecimento da resposta do fluxo de potência

nos sistemas, escolher qual ação melhor se adapta para ser aplicada, seja ela isolada ou em conjunto.

1.3 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é utilizar o fluxo de potência continuado para testar ações de controle em diversos sistemas, no intuito de estudar a sua influência na margem de carga dos mesmos.

1.4 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho teve início mediante realização de pesquisas bibliográficas. Estas pesquisas se concentram nas áreas de estabilidade de sistemas elétricos de potência com ênfase na curva PV. Após a análise bibliográfica foi feita uma simulação computacional criando um fluxo de potência continuado através do software MATLAB®, avaliando inicialmente a margem de carga dos sistemas e, posteriormente, como os mesmos se comportam mediante a aplicação de três ações de controle. Este algoritmo foi testado em sete diferentes sistemas do IEEE. Os resultados obtidos são mostrados nos próximos capítulos.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi organizado em 6 capítulos divididos da seguinte forma:

- Capítulo 1: Corresponde à apresentação do tema, do objetivo do trabalho bem como uma visão geral do mesmo.
- Capítulo 2: São apresentados conceitos de formulação básica explicitando os principais termos do fluxo de potência e fluxo de potência continuado em sistemas elétricos. São apresentados, ainda, conceitos de estabilidade e curvas PV's.
- Capítulo 3: Retrata a metodologia utilizada para estudar as curvas PV's antes e após a aplicação das ações de controle.
- Capítulo 4: Mostra os resultados alcançados ao aplicar as ações de controle nos sistemas de maneira individual e de maneira conjunta.
- Capítulo 5: Apresenta as conclusões e melhorias que podem ser feitas para viabilizar o aumento da margem de carga de sistemas elétricos.

- Capítulo 6: Considerações finais e algumas sugestões para trabalhos futuros.

2. FLUXO DE POTÊNCIA

Este capítulo tem por finalidade apresentar conceitos fundamentais sobre o fluxo de potência que será utilizado como base para o entendimento da metodologia e dos resultados obtidos neste trabalho.

2.1 EVOLUÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA

Até o fim de 1940 e no início de 1950, os trabalhos utilizando simulações de fluxo de potência eram realizados apenas por meio de pequenos modelos de sistemas de potência, onde estes eram conhecidos como analisadores de redes. Além do vasto trabalho imposto para ajustar as configurações iniciais, a análise dos resultados era feita de forma lenta, uma vez que era necessário fazer a leitura de vários instrumentos de medição e anotar todos os valores correspondentes em diagramas traçados de maneira manual.

Com a aparição dos computadores digitais a partir de 1950, estes analisadores de rede foram trocados por programas aptos a efetuar simulações que descreviam numericamente o comportamento dos SEP's (STAGG, 1979).

O primeiro método numérico utilizado para realizar o cálculo de fluxo de potência foi chamado de *Gauss-Seidel*, cujo o nome é uma homenagem aos matemáticos alemães *Carl Friedrich Gauss e Philipp Ludwig von Seidel*. O método era de concepção simples, entretanto, sua aplicação se mostrava mais trabalhosa pois a convergência do processo era lenta (STEVESON, 1974). Devido a sua simplicidade e baixa ocupação de memória do computador este método ainda é bastante utilizado em termos acadêmicos, porém, muitas vezes ele não alcança soluções que podem ser obtidas pelos métodos mais atuais. Além disso, sua convergência exata não é garantida para qualquer sistema.

Pouco depois em 1960, surgiu o método de *Newton* que apresentava uma resposta de convergência bem melhor, porém, não era de fácil manejo computacional (VAN NESS, 1959). No final dos anos 60, surgiram novas técnicas para armazenamento de dados, permitindo a compactação e o uso de ordenamento da fatorização, fazendo com que o método de *Newton* se tornasse mais rápido e consumisse menor capacidade dos computadores (STOTT, 1974).

Já no começo de 1970 apareceram os métodos desacoplados, que são baseados no método de *Newton-Raphson*. Estes métodos apresentavam a vantagem de serem mais rápidos que os outros citados, sendo capazes de manter a precisão e a convergência do sistema. Nos

dias de hoje o método de *Newton-Raphson* e seus derivados continuam sendo os mais utilizados (VAN NESS, 1959). Por ser o método embasado neste trabalho, o mesmo será explicitado nos tópicos a seguir.

2.2 ESTUDOS DEPENDENTES DO FLUXO DE POTÊNCIA

Para o exercício de suas atribuições legais e o cumprimento de sua missão institucional, o Operador Nacional do Sistema Elétrico desenvolve uma série de estudos e ações na operação coordenada centralizada do SIN (Sistema Interligado Nacional) e na administração dos serviços de transmissão na Rede Básica (instalações com tensões iguais ou maiores que 230 kV). Estes serviços são feitos com a utilização do fluxo de potência e podem ser agrupados em diferentes macroprocessos (ONS, 2016):

- **Ampliações e Reforços na Rede Básica**

O Plano de Ampliações e Reforços na Rede Básica é um dos principais produtos do ONS. É realizado anualmente, com um horizonte de estudo de três anos, e estabelece as necessidades de expansão da Rede Básica para preservar seu adequado desempenho operacional e garantir o livre acesso.

- **Avaliação das Condições Futuras da Operação**

A partir de informações recebidas das autoridades setoriais e dos agentes associados sobre a oferta futura de energia e sobre as previsões de consumo do mercado, o operador utiliza modelos matemáticos de otimização e simulação da operação para determinar estratégias operativas e avaliações das condições de suprimento ao SIN. Nesse estudo são realizadas avaliações probabilísticas do atendimento ao mercado em que se calculam os riscos de ocorrência de déficits. Para que se possa verificar a influência futura das decisões operativas tomadas no ano, esse estudo tem um horizonte de análise de cinco anos.

- **Resultados da Operação**

A operação em tempo real procura seguir as normas e instruções de operação e atender às diretrizes e recomendações da programação, objetivando conjugar os requisitos de continuidade, segurança e economicidade do suprimento. As ações empreendidas pelo Centro Nacional de Operação do Sistema e pelos Centros Regionais de Operação do Sistema a ele subordinados, fazem o monitoramento e correção das condições operativas em função das variações da carga e do estado dos equipamentos que compõem o SIN a cada instante.

- Indicadores de Desempenho do SIN

O conjunto de indicadores de desempenho do SIN pode ser separado em dois blocos: os indicadores de continuidade nos pontos de controle da Rede Básica e os indicadores de qualidade da operação. Os indicadores de continuidade do serviço na Rede Básica de transmissão são apurados pelo ONS desde 2000 nas instalações que formam a fronteira entre a Rede Básica de transmissão e as demais instalações do sistema. Os indicadores mais utilizados são a Duração da Interrupção do Ponto de Controle - DIPC - e a Frequência da Interrupção do Ponto de Controle - FIPC. Esses parâmetros evidenciam a eficiência dos serviços prestados pelos transmissores e pelo ONS, assim como o nível de redundância de suas instalações. Os indicadores de qualidade da operação mostram a evolução do número de perturbações no sistema e de seu impacto sobre o atendimento aos consumidores. Faz parte desse conjunto o número de perturbações que resultaram em cortes de carga, o índice de robustez do sistema, que é a relação entre o número de perturbações sem corte de carga e o total de perturbações em um dado período, e a energia não suprida.

- Integração de Novas Instalações ao SIN

Esse processo de integração abrange novas instalações e alterações de características de instalações já existentes, uma vez que a entrada em operação dessas instalações afeta não só a operação do SIN como também os encargos de uso do sistema de transmissão.

Em sequência serão apresentadas as principais equações que regem a formulação do fluxo de potência. Estas equações são utilizadas para efetuar os cálculos e compreender os resultados que serão apresentados nos próximos capítulos.

2.3 FORMULAÇÃO BÁSICA

Para formular um sistema através do fluxo de potência utiliza-se o exemplo clássico onde se considera que cada barra do sistema tem nela associada seis variáveis a serem descobertas (MONTICELLI, 1983):

- V_k – Magnitude da tensão na barra k;
- θ_k – Ângulo da tensão na barra k (defasagem com relação ao ângulo da barra de referência);

- P_k – Potência ativa líquida calculada na barra k;
- Q_k – Potência reativa líquida calculada na barra k;
- P_{kc} – Potência ativa consumida na barra k pela carga c;
- Q_{kc} – Potência reativa consumida na barra k pela carga c;

Como no fluxo de potência convencional as cargas ativas e reativas (potência consumidas) são supostamente conhecidas, restam em cada barramento 4 variáveis a serem determinadas, que são as potências ativa e reativa geradas, o módulo da tensão e seu respectivo ângulo de fase. Para que seja possível criar uma solução, para cada barra são fornecidas inicialmente, duas variáveis, e as duas outras incógnitas, são calculadas e encontradas através do fluxo de potência. Através das variáveis que são conhecidas é possível classificar cada barra em um dos três tipos abaixo:

- Barra de referência ou barra *Slack*: São fornecidos V_k e Θ_k , enquanto que P_k e Q_k são calculados.
- Barra de Geração ou barra PV: São fornecidos P_k e V_k enquanto que Q_k e Θ_k são calculados.
- Barra de Carga ou barra PQ: São fornecidos P_k e Q_k , enquanto que Θ_k e V_k são calculados.

A barra *slack* ou de referência fornece a referência angular, sendo amplamente utilizada para fechar o balanço de potência do sistema, visto que é a única barra do sistema sem injeção de potência ativa definida antecipadamente (MONTICELLI, 1983).

Para cada barra do sistema, são associadas duas equações baseadas na primeira lei de *Kirchhoff*, onde a primeira equação representa a injeção de potência ativa e a segunda a injeção de potência reativa. As mesmas estão representadas a seguir:

$$P_k = \sum_{m \in \Omega_k} P_{km} (V_k, V_m, \theta_k \text{ e } \theta_m) \quad (1)$$

$$Q_k + Q_k^{sh}(V_k) = \sum_{m \in \Omega_k} Q_{km} (V_k, V_m, \theta_k \text{ e } \theta_m) \quad (2)$$

Em que:

$k = 1, 2, \dots$, representando o número de barras da rede;

Ω_k – Conjunto de barras vizinhas da barra k;

V_k, V_m – Magnitude das tensões das barras terminados do ramo k-m;

θ_k, θ_m – Ângulos das tensões das barras terminais dos ramos k-m;

P_{km} – Fluxo de potência ativa no ramo k-m;

Q_{km} – Fluxo de potência reativa no ramo k-m;

Q_k^{sh} – Componente de injeção de potência reativa devido ao elemento shunt da barra k.

Nesta formulação, quando se tem potência saindo da barra, a mesma está gerando energia e seu sinal na equação é positivo. Quando há potência entrando na barra a mesma está consumindo energia, neste caso seu sinal é negativo (GRAINGER, 1994). Esta questão será de suma importância para definir o aumento ou a queda da margem de carga do sistema. Outro ponto importante a ser considerado é quanto ao valor de potência reativa gerada pelas curvas PV's, pois caso a mesma atinja seu limite de geração de potência reativa a mesma passa a gerar o valor limite encontrado, fazendo com que a mesma perca o controle do nível de tensão e se torne na formulação do fluxo de potência uma barra PQ.

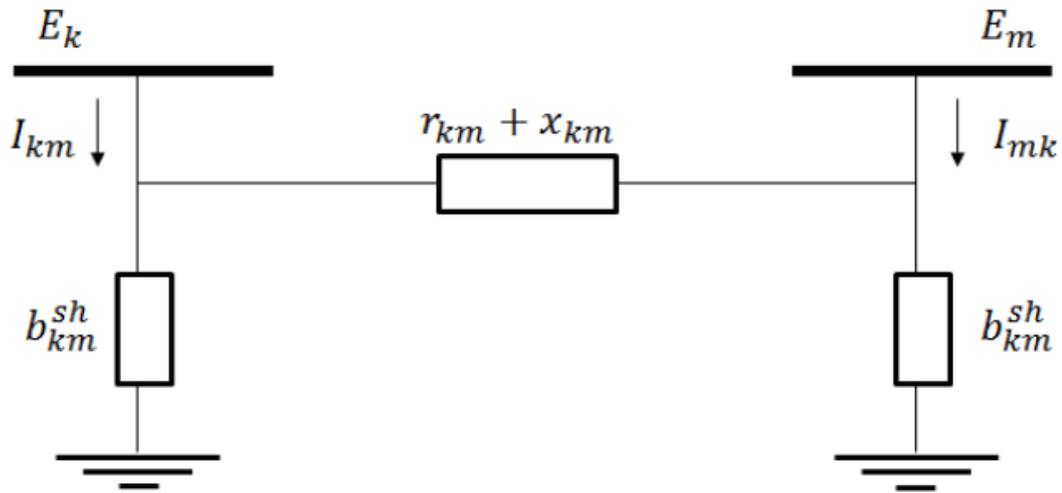
2.4 MODELAGEM DO SISTEMA

A seguir são retratados os modelos de linhas de transmissão e de transformadores.

2.4.1 LINHAS DE TRANSMISSÃO

Para iniciar a análise do fluxo de potência se faz necessário explorar a modelagem da linha de transmissão. O método mostrado na figura 1 adota o modelo π – equivalente de uma linha de transmissão. Este modelo é definido por três parâmetros: uma resistência série r_{km} , uma reatância série X_{km} e a susceptância shunt da linha b_{km}^{sh} .

Figura 1 - Modelo de linha de transmissão.



Fonte: ABRANTES, 2013.

A impedância série para este modelo pode ser expressa por:

$$z_{km} = r_{km} + x_{km} \quad (3)$$

Enquanto que a admitância se dá por:

$$y_{km} = g_{km} + jb_{km} \quad (4)$$

As correntes podem então ser expressas por:

$$I_{km} = (y_{km} + jb_{km}^{sh})E_k - y_{km}E_m \quad (5)$$

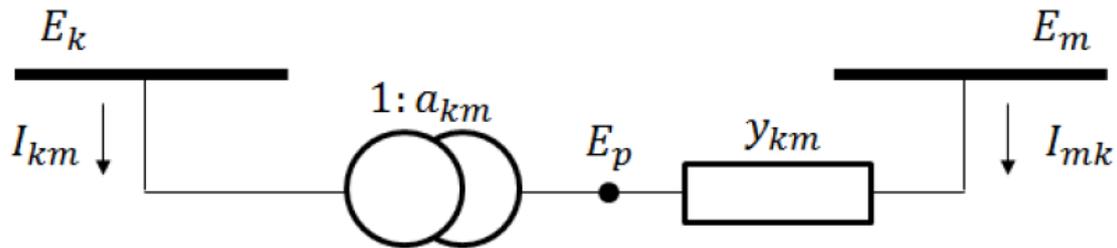
$$I_{mk} = -y_{km}E_k + (y_{km} + jb_{km}^{sh})E_m \quad (6)$$

Ressalta-se que em caso da rede ser composta por um número maior de barras, é adequado representar o sistema de transmissão por meio da matriz de admitância nodal, representando cada barra do sistema por uma linha e uma coluna, formando uma matriz quadrada com ordem igual ao número de barras do sistema (STEVESON, 1994).

2.4.2 TRANSFORMADOR EM FASE

O modelo deste transformador é formado pela sua razão de transformação a_{km} e pela sua admitância série y_{km} , conforme mostrado na figura 2.

Figura 2 – Modelo de transformador em fase.



Fonte: ABRANTES, 2013.

Para o transformador ideal, a potência é dada por:

$$E_k I_{km}^* + E_p I_{mk}^* = 0 = E_k I_{km}^* + (a_{km} E_k I_{km}^*) \quad (7)$$

Com isso, a relação entre as correntes é:

$$\frac{I_{km}}{I_{mk}} = -a_{km} \quad (8)$$

Através da relação abaixo:

$$\frac{E_k}{E_p} = a_{km}^{-1} = -\frac{I_{mk}}{I_{km}} = \frac{I_{pm}}{I_{km}} \quad (9)$$

É possível escrever as equações para encontrar os valores de I:

$$I_{km} = a_{km} I_{pm} = -a_{km} I_{mk} \quad (10)$$

$$I_{mk} = y_{km} (E_m - a_{km} E_k) \quad (11)$$

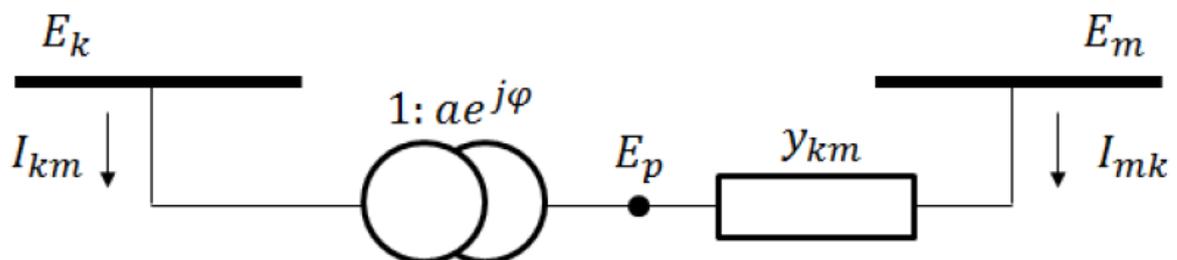
$$I_{km} = (a_{km}^2 y_{km}) E_k + (-a_{km} y_{km}) E_m \quad (12)$$

$$I_{mk} = (-a_{km} y_{km}) E_k + (y_{km}) E_m \quad (13)$$

2.4.3 TRANSFORMADOR DEFASADOR

O modelo de transformador defasador é formado pela sua razão de transformação complexa $1:ae^{j\varphi}$ conforme a figura 3:

Figura 3 – Modelo de transformador defasador.



Fonte: ABRANTES, 2013.

Executando os mesmos passos feitos no transformador em fase, porém adicionando a razão de transformação complexa $1:ae^{j\varphi}$ obtém-se:

$$I_{km} = (a^2 y_{km})E_k + (-ae^{j\varphi} y_{km})E_m \quad (14)$$

$$I_{mk} = (-ae^{j\varphi} y_{km})E_k + (y_{km})E_m \quad (15)$$

Verifica-se que diferentemente da linha de transmissão e do transformador em fase analisados anteriormente, o transformador defasador aponta coeficientes diferentes para as tensões da barra onde a corrente flui. Este fator determina que a matriz de admitância seja numericamente assimétrica.

2.5 EXPRESSÕES GERAIS DOS FLUXOS DE POTÊNCIAS

Os fluxos de potência ativa e reativa, sejam em qualquer elemento, seguem às expressões gerais:

$$P_{km} = (a_{km} V_k)^2 g_{km} - (a_{km} V_k) V_m [g_{km} \cos(\Theta_{km} + \varphi_{km}) + b_{km} \sin(\Theta_{km} + \varphi_{km})] \quad (16)$$

$$Q_{km} = -(a_{km} V_k)^2 (b_{km} + b_{km}^{sh}) - (a_{km} V_k) V_m [g_{km} \sin(\Theta_{km} + \varphi_{km}) - b_{km} \cos(\Theta_{km} + \varphi_{km})] \quad (17)$$

$$P_{mk} = g_{km} V_m^2 - (a_{km} V_k) V_m * [g_{km} \cos(\Theta_{km} + \varphi_{km}) - b_{km} \sin(\Theta_{km} + \varphi_{km})] \quad (18)$$

$$Q_{mk} = -(b_{km} + b_{km}^{sh}) V_m^2 + (a_{km} V_k) V_m [g_{km} \sin(\Theta_{km} + \varphi_{km}) + b_{km} \cos(\Theta_{km} + \varphi_{km})] \quad (19)$$

Onde:

$$\Theta_{km} = \Theta_k - \Theta_m \quad (20)$$

2.6 MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON NA SOLUÇÃO DE FLUXO DE POTÊNCIA

Conforme citado no tópico 2.1, com o crescimento dos sistemas elétricos os mesmos aumentaram assim a sua complexidade, fazendo com que o método de *Newton-Raphson* fosse mais utilizado. Segundo referências especializadas nesta técnica, este método é o mais robusto para se calcular fluxos de potência em redes de transmissão e sub-transmissão. A razão disso se dá pelo mesmo não oferecer riscos de divergência, além de o seu resultado ser encontrado de forma mais rápida do que em outros métodos.

A descrição do algoritmo utilizado para resolução de um sistema n-dimensional composto por uma função vetorial $g(x) = 0$ é dada por (CANOSSA, 2007):

- i. Faz-se $i = 0$, escolhe os valores iniciais dos ângulos das tensões das barras PV e PQ e os valores de magnitude das tensões as barras PQ;
- ii. Calcula-se $P_k(V^i, \theta^i)$ para as barras PQ e PV, $Q_k(V^i, \theta^i)$ para as barras PQ, e determinar o vetor dos resíduos ΔP_k e ΔQ_k ;
- iii. Testar a convergência: se $\max_{k \in \{PQ+PV\}} \{|\Delta P_k^i|\} \leq \epsilon_p$ e $\max_{k \in \{PQ\}} \{|\Delta Q_k^i|\} \leq \epsilon_q$, o processo convergiu para a solução (V^i, θ^i) ; caso contrário, continuar;
- iv. Calcular a matriz Jacobiana:

$$J(V^i, \theta^i) = \begin{array}{|c|c|} \hline H(V^i, \theta^i) & N(V^i, \theta^i) \\ \hline M(V^i, \theta^i) & L(V^i, \theta^i) \\ \hline \end{array}$$

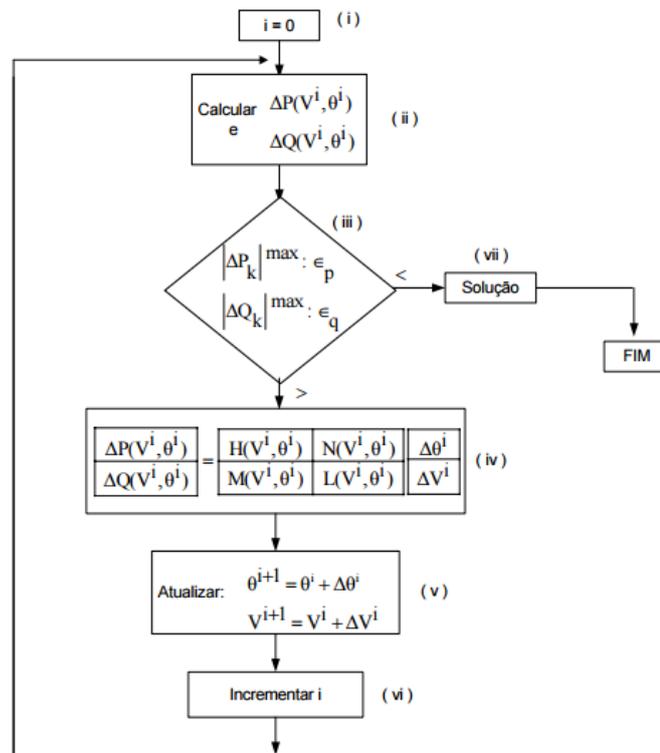
- v. Determinar a nova solução (V^{i+1}, θ^{i+1}) , onde $\theta^{i+1} = \theta^i + \Delta\theta^i$ e $V^{i+1} = V^i + \Delta V^i$, sendo que $\Delta\theta^i$ e ΔV^i , são obtidos com a solução do seguinte sistema linear:

$$\begin{array}{|c|} \hline \Delta P(V^i, \theta^i) \\ \hline \Delta Q(V^i, \theta^i) \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|c|} \hline H(V^i, \theta^i) & N(V^i, \theta^i) & \Delta\theta^i \\ \hline M(V^i, \theta^i) & L(V^i, \theta^i) & \Delta V^i \\ \hline \end{array}$$

- vi. Fazer $i = i + 1$ e voltar o passo (ii).

A Figura 4 apresenta na forma de fluxograma, o algoritmo do método de Newton-Raphson:

Figura 4 – Fluxograma do método de Newton-Raphson.



Fonte: CANOSSA, 2007

Pode-se dizer que o método de Newton-Raphson apresenta as seguintes características:

- Número de iterações independe da dimensão do problema;
- Necessita de um maior espaço de memória;
- Sua convergência é mais garantida do que métodos como o de Gauss;
- Necessita de um chute inicial;
- O tempo de duração do código depende em sua maioria do período para o cálculo da matriz Jacobiana e sua inversa.

Em seguida será apresentado com mais detalhes os principais pontos relativos à estabilidade de sistemas, onde os tipos de estabilidades serão citados mantendo o enfoque na estabilidade de tensão uma vez que o trabalho feito é através da mesma.

2.7 ESTABILIDADE

Como citado anteriormente, a análise de estabilidade é uma das ferramentas mais utilizadas ao se estudar sistemas elétricos de potência, sendo empregue tão comumente como

a análise de fluxo de potência e de curto-circuito. No entanto, a análise de estabilidade, em termos de modelagem e de método de solução, é a mais complexa entre as citadas quando se analisa grandes distúrbios como a saída de linhas de transmissão. A estabilidade é definida como a capacidade de um sistema de potência em se manter estável em condições normais de operação após ser submetido a um distúrbio (KUNDUR, 1994). A seguir segue, os três tipos de estabilidade e sua definição:

- Estabilidade angular

A estabilidade angular é explorada em conjunto de máquinas síncronas. Em seguida de um distúrbio, se conservado o equilíbrio entre o torque mecânico e o magnético de cada máquina, o sistema é estável. Caso contrário, surge um aumento das oscilações em um dos geradores, perdendo o sincronismo e levando o sistema à instabilidade (IEEE, 2004).

- Estabilidade de frequência

Está associada com a capacidade do sistema em manter sua frequência próxima do valor nominal, após um distúrbio da rede, resultado de um desequilíbrio entre a carga e a geração (BARBOSA, 2013).

- Estabilidade de tensão

Está ligada à capacidade do sistema em permanecer com os valores das tensões de todos os barramentos, dentro dos limites operacionais depois da ocorrência de uma perturbação (KUNDUR, 1994). Uma das ferramentas utilizadas para avaliar a estabilidade de tensão dos sistemas são as curvas PV's, sendo as mesmas apresentadas no próximo tópico.

2.8 CURVAS PV

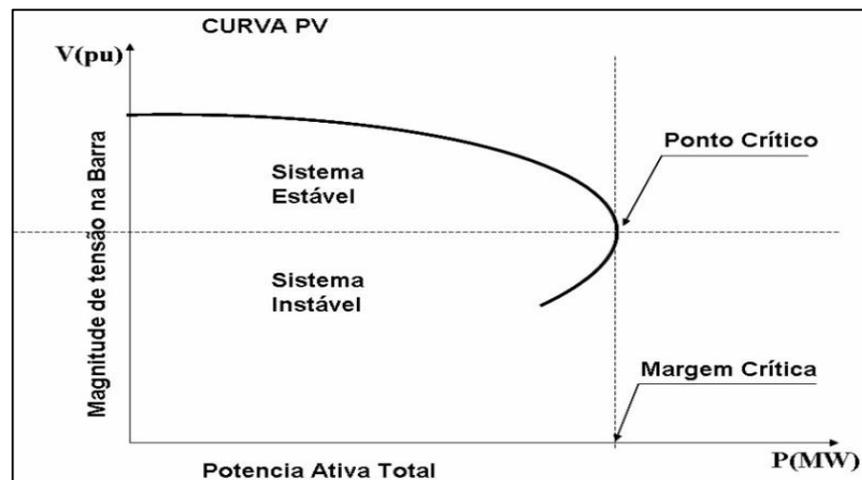
A característica de indicar qual o valor de carregamento máximo de um sistema é conhecida através da curva PV, onde a mesma é obtida pela relação entre a potência ativa e a magnitude da tensão em um determinado barramento, dada uma condição própria de fator de potência e tensão em um mesmo barramento. A criação da curva PV compreende em realizar sucessivos cálculos de fluxo de potência (fluxo continuado) tendo como referência um ponto de operação inicial que é reconhecido como caso base, a partir disso são considerados sucessivos aumentos de carga em uma determinada área do sistema, barramento ou até mesmo em todo o sistema. O acréscimo de carga pode ser feito mantendo o fator de potência

constante ou realizando a sua variação, ressaltando que, a cada inserção de carga realizada gera-se um novo fluxo de potência, para que seja possível determinar os pontos de operação que vão constituir a curva PV. O emprego das curvas PV's pode ser de utilidade em vários cenários tais como (MALANGE, 2008):

- Análise estratégica de planejamento e operação de sistemas de potência;
- Determinação de limites de transferência de potência;
- Ajuste da margem de carga.

Conforme a figura 5, a qual representa uma curva PV, a variação da tensão de uma determinada barra está em função da variação de potência ativa total do sistema, e cada ponto da curva equivale a um ponto operativo para um determinado valor de carregamento do sistema, que é definido por meio de um fluxo de potência para as condições deste ponto operativo.

Figura 5 - Curva PV



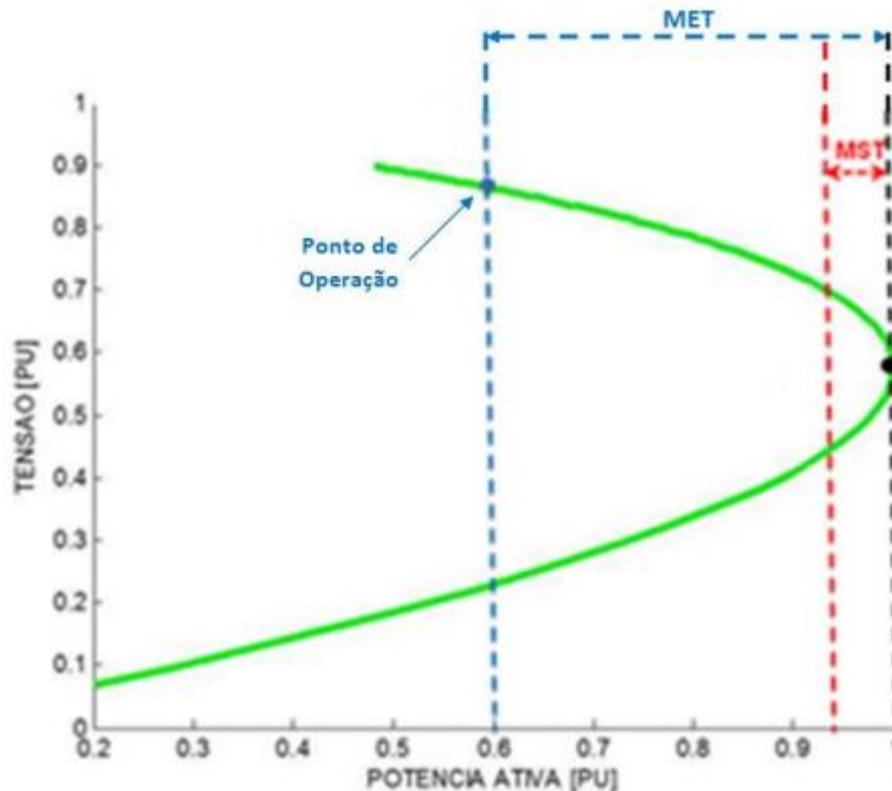
Fonte: CARVALHO, 2015.

No ponto de inflexão da curva nota-se o ponto crítico do carregamento do sistema, onde qualquer acréscimo de carga ocasiona em instabilidade, podendo provocar afundamentos de tensão. Na imediação do ponto crítico, o fluxo de potência não converge, visto que neste ponto a matriz Jacobiana torna-se singular e, portanto, seu determinante é nulo. Os pontos da curva situados acima do ponto crítico do carregamento representam a região de estabilidade do sistema, enquanto que os pontos abaixo representam os pontos de operação instáveis.

2.9 MARGEM DE CARGA

O termo margem de carga pode ser definido como a distância entre um ponto operativo qualquer até o ponto crítico (SILVEIRA, 2003), considerando o eixo horizontal do gráfico, assim como mostrado na figura 6.

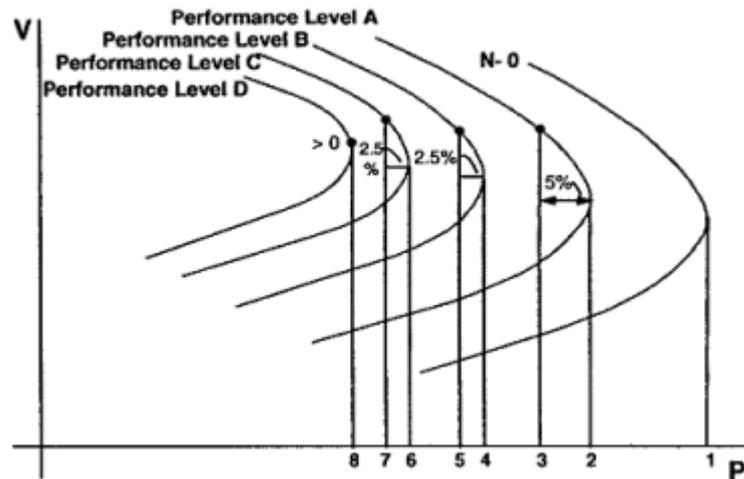
Figura 6 – Identificação da Margem de carga (MET) sobre uma Curva PV



Fonte: VALE, 2012.

Em 1998 a Western Electricity Coordinating Council (WECC) dos Estados Unidos introduziu o que chamaram de Margem Mínima para a Estabilidade de Tensão ou Margem de Carga. Esta é dada como uma porcentagem da potência ativa ou reativa no ponto de máxima transferência de potência, para as diferentes contingências que possam acontecer no sistema e sejam capazes de afetar a estabilidade de tensão do mesmo. Conforme mostrado na Figura 7, as margens de carga apresentam valores diferentes para diferentes tipos de contingências, estabelecendo níveis de desempenho segundo as considerações apresentadas na Tabela 1 adaptada de (THOMAS, 1998):

Figura 7 – Margem de Estabilidade de Tensão segundo o WECC



Fonte: THOMAS, 1998.

Tabela 1 - Níveis de Desempenho de Estabilidade de Carga segundo WECC.

Nível de Desempenho	Tipo de Contingência	MW Margem
A	Desligamento de apenas um elemento do sistema	$\geq 5\%$
B	Perda de barramento	$\geq 2,5\%$
C	Desligamento de dois elementos do sistema	$\geq 2,5\%$
D	Desligamento de três elementos do sistema	$> 0\%$

Fonte: THOMAS, 1998.

No próximo capítulo será determinada a margem de carga de vários sistemas e, em sequência, três ações de controle serão aplicadas nos mesmos em diferentes cenários, no intuito de identificar como será a resposta do sistema mediante a estas ações.

3. METODOLOGIA

Neste capítulo retrata-se a maneira como as curvas PV's foram traçadas para diferentes sistemas, posteriormente são apresentadas as margens de carga destes sistemas. Em seguida são indicadas as ações de controle que serão usadas neste trabalho e como elas serão inseridas dentro da formulação do fluxo de potência.

3.1 INTRODUÇÃO

Com o intuito de traçar as curvas PV's e estabelecer a margem de carga para os sistemas estudados, aplica-se neste capítulo o método continuado do fluxo de potência nos seguintes sistemas:

- Três barras;
- Seis barras;
- Nove barras;
- Quatorze barras;
- Trinta barras;
- Cinquenta e sete barras;
- Cento e dezoito barras.

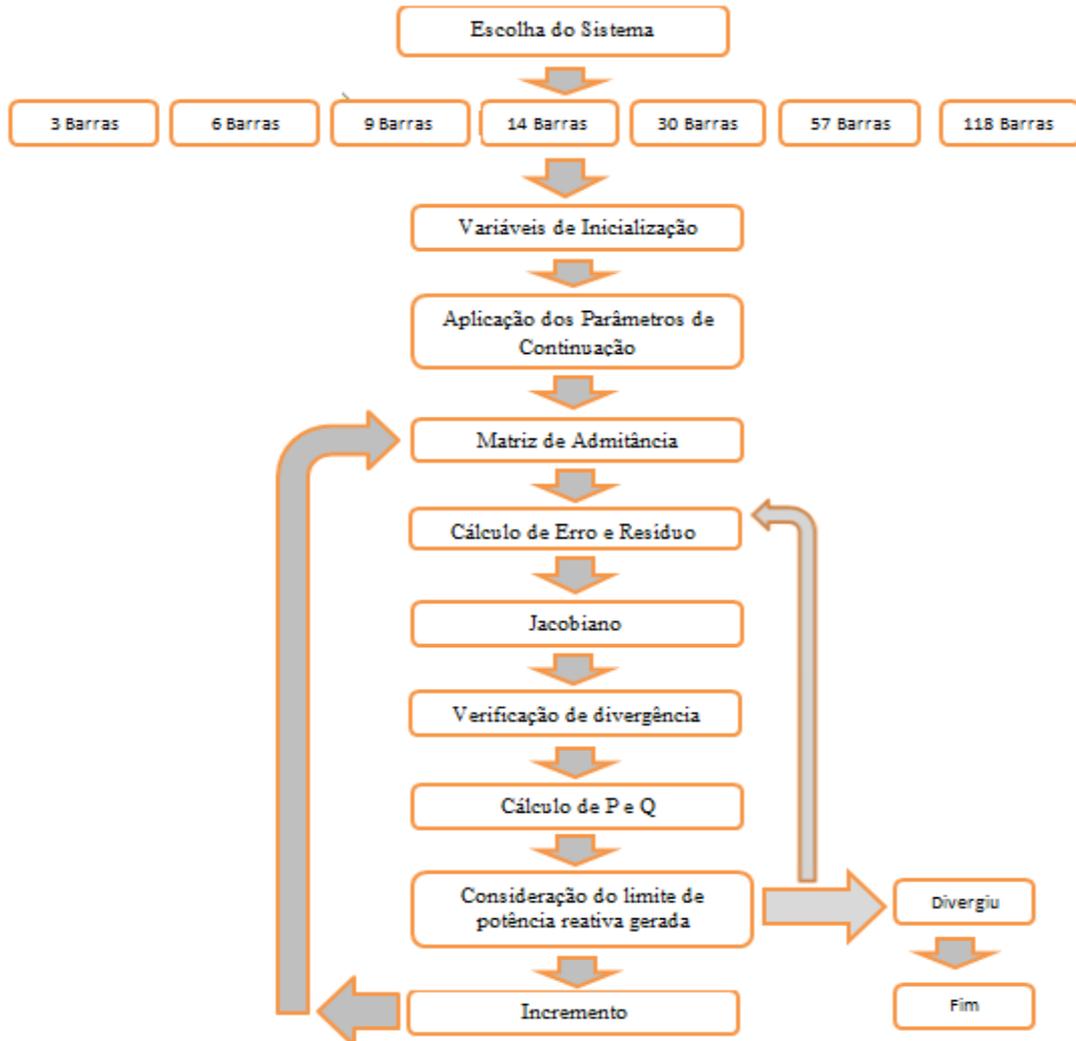
Para encontrar as curvas PV's, o primeiro passo foi desenvolver um fluxo de potência continuado. O método do fluxo de potência continuado (FPC) serve para encontrar o ponto de máximo carregamento do sistema através de sucessivas soluções das equações de fluxo de potência. O aumento gradativo da carga é feito através da variação incremental de um fator de carregamento "x", solucionando o problema de fluxo de potência até que o processo divirja, possibilitando a obtenção aproximada da margem de carga através da curva PV, visto que nesse ponto a matriz Jacobiana se torna singular. Em seguida é apresentada a maneira como o programa foi criado.

3.2 DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO

Para criação do fluxo de potência continuado, primeiro se faz necessário gerar o fluxo de potência básico conforme os passos apresentados no método de *Newton-Raphson* e, em seguida, consideram-se os parâmetros de continuação. Neste trabalho os parâmetros

considerados são: potência ativa gerada, carga ativa e carga reativa. Logo, os passos para criar o fluxo continuado podem ser observados no fluxograma apresentado na figura 8:

Figura 8 - Fluxograma para criação do Fluxo de Potência continuado.



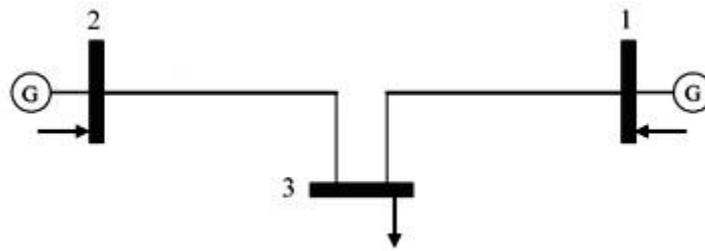
Fonte: próprio autor.

3.3 FLUXO DE POTÊNCIA CONTINUADO PARA OS SISTEMA

3.3.1 SISTEMA DE 3 BARRAS

O estudo sobre a margem de carga teve início com o sistema de 3 barras, apresentado na figura 9:

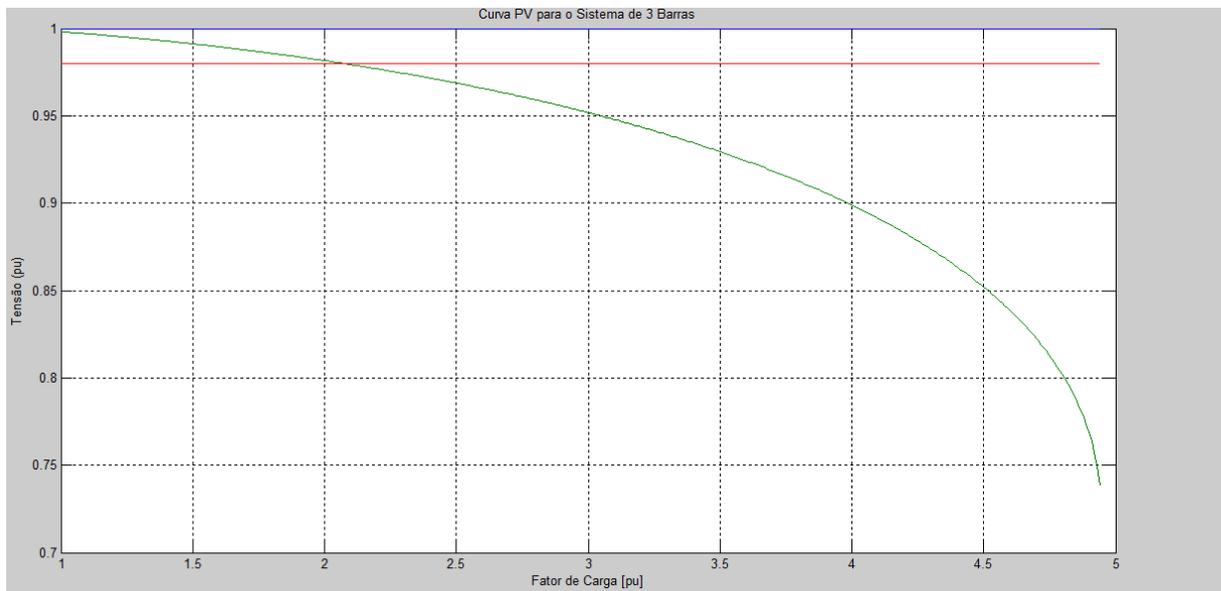
Figura 9 - Sistema de 3 barras.



Fonte: próprio autor

Aplicando o fluxo de potência continuado para este sistema, na figura 10, tem-se sua curva PV. A margem de carga encontrada para este sistema foi de 4.94 [PU].

Figura 10 - Curva PV para o sistema de 3 barras.

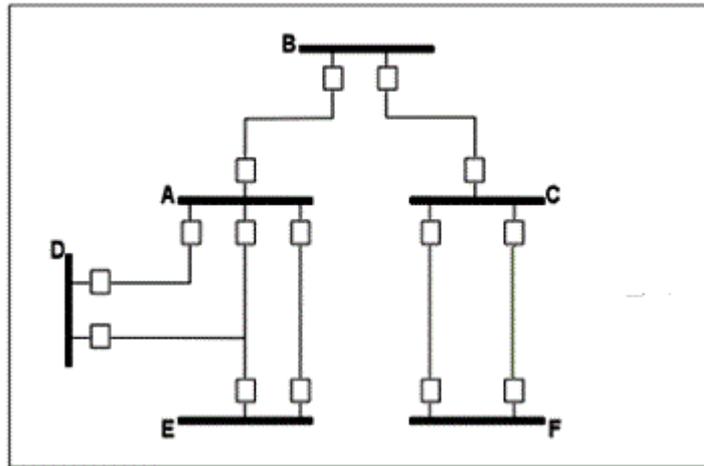


Fonte: próprio autor

3.3.2 SISTEMA DE 6 BARRAS

Em seguida utilizou-se o sistema de 6 barras, onde sua disposição pode ser vista na figura 11:

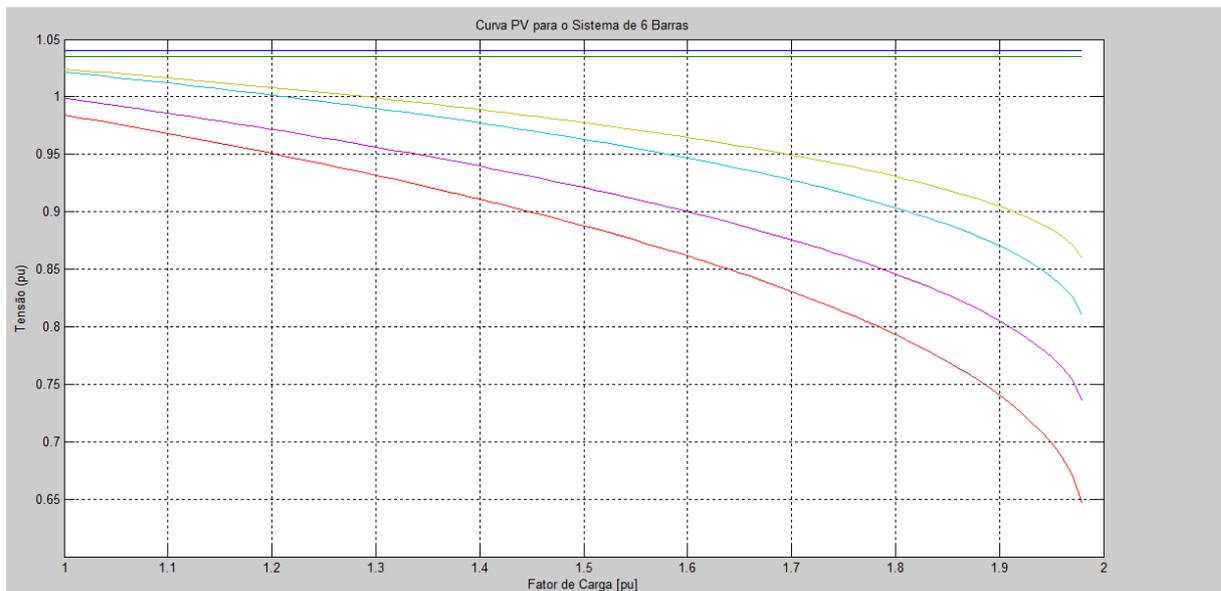
Figura 11 – Sistema de 6 barras.



Fonte: próprio autor.

Aplicando o fluxo de potência continuado para este sistema, na figura 12, tem-se sua curva PV. A margem de carga encontrada para este sistema foi de 1.98 [PU].

Figura 12 - Curva PV para o sistema de 6 barras.

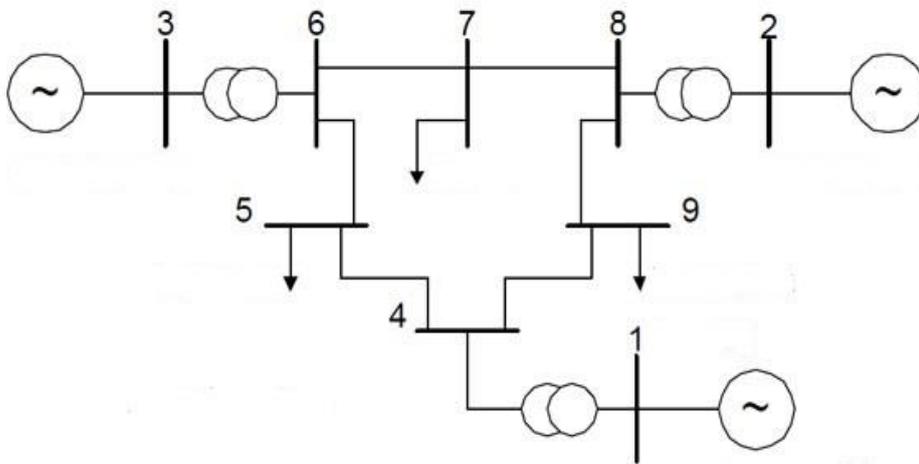


Fonte: próprio autor

3.3.3 SISTEMA DE 9 BARRAS

Posteriormente, o sistema utilizado foi de nove barras, que possui a seguinte disposição mostrada na figura 13:

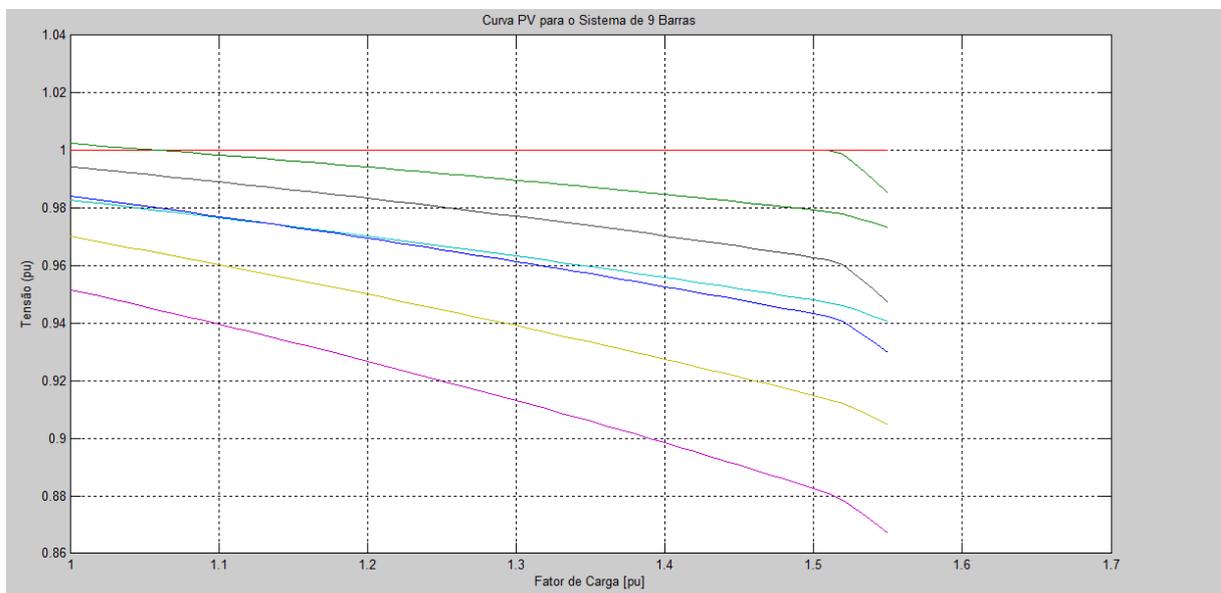
Figura 13 - Sistema de 9 barras.



Fonte: próprio autor.

Aplicando o fluxo de potência continuado para este sistema, na figura 14, tem-se sua curva PV. A margem de carga encontrada para este sistema foi de 1.55 [PU].

Figura 14 – Curva PV para o sistema de 9 barras.

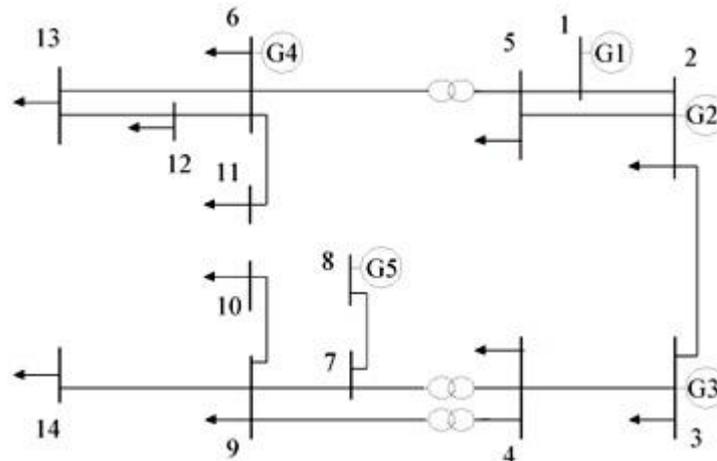


Fonte: próprio autor.

3.3.4 SISTEMA DE 14 BARRAS

Seguidamente, utilizou-se o sistema de 14 barras, cuja disposição segue na figura 15:

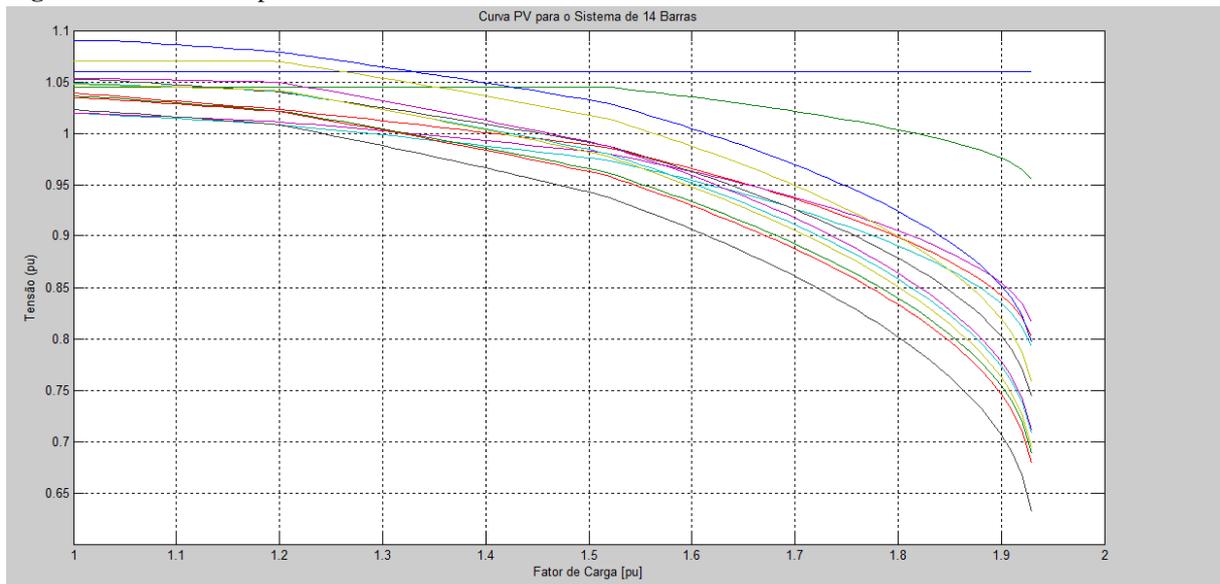
Figura 15 - Sistema de 14 barras.



Fonte: próprio autor.

Aplicando o fluxo de potência continuado para este sistema, na figura 16 tem-se sua curva PV. A margem de carga encontrada para este sistema foi de 1.93 [PU].

Figura 16 – Curva PV para o sistema de 14 barras.

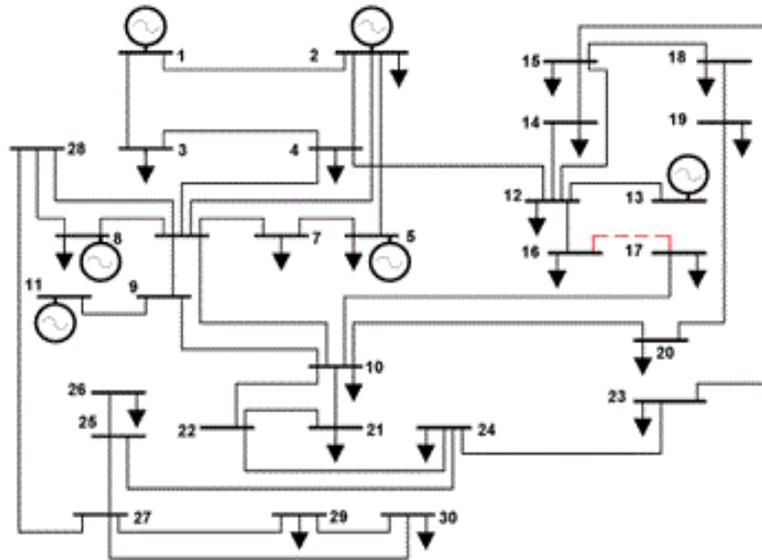


Fonte: próprio autor.

3.3.5 SISTEMA DE 30 BARRAS

Em seguida, utilizou-se o sistema de 30 barras para efetuar a simulação, a disposição deste sistema pode ser vista na figura 17:

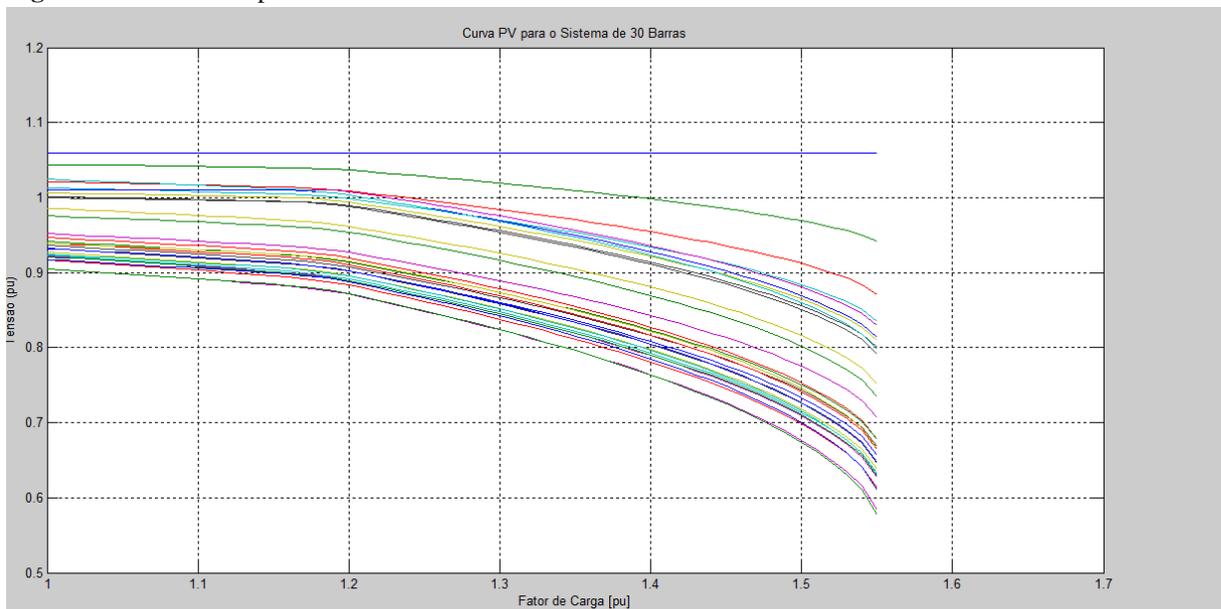
Figura 17 – Sistema de 30 barras.



Fonte: próprio autor.

Aplicando o fluxo continuado para este sistema, tem-se sua curva PV apresentada na figura 18. A margem de carga encontrada para este sistema foi de 1.55 [PU].

Figura 18 – Curva PV para o sistema de 30 barras.

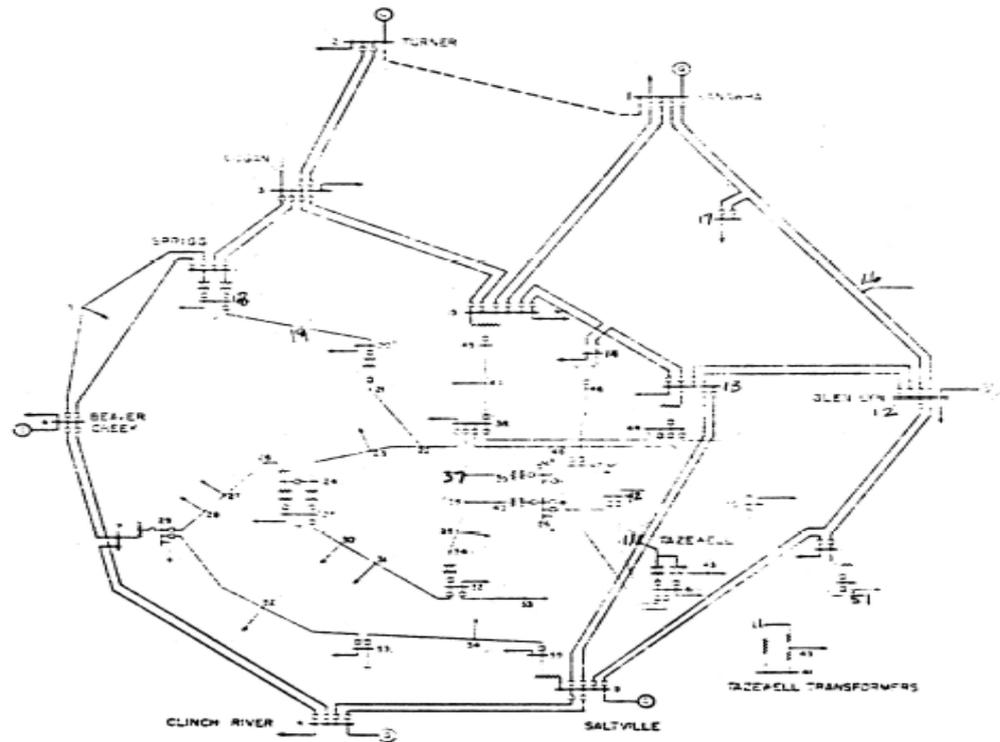


Fonte: próprio autor.

3.3.6 SISTEMA DE 57 BARRAS

Dando sequência nas simulações, utilizou-se o sistema com 57 barras, com a sua disposição mostrada na figura 19:

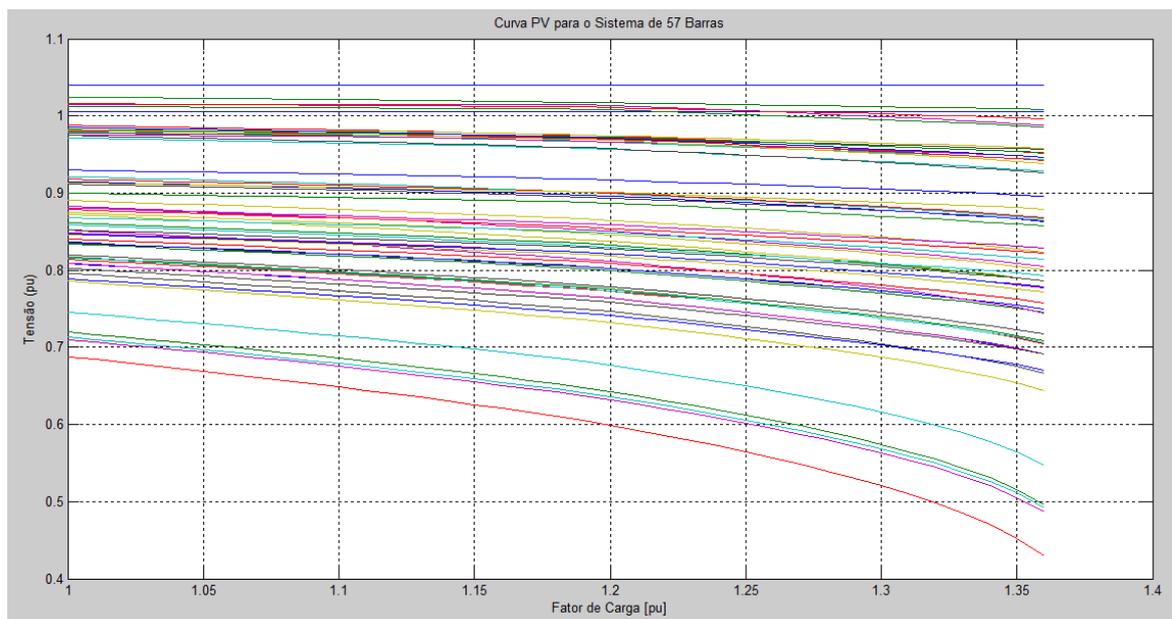
Figura 19 – Sistema de 57 barras.



Fonte: SANTOS, 2013.

Na figura 20, tem-se a curva PV gerada para o sistema acima. A margem de carga encontrada para o mesmo foi de 1.37 [PU].

Figura 20 – Curva PV para o sistema de 57 barras.

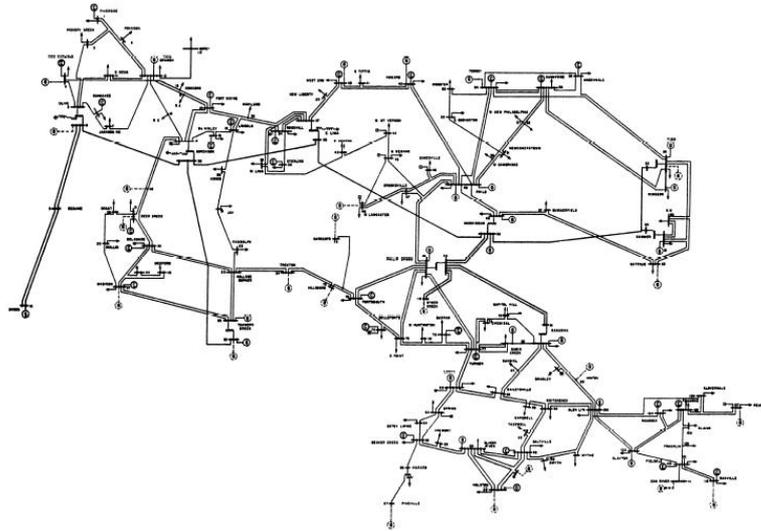


Fonte: próprio autor

3.3.7 SISTEMA DE 118 BARRAS

O último sistema utilizado para simulação foi o de 118 barras, cuja disposição pode ser vista na figura 21:

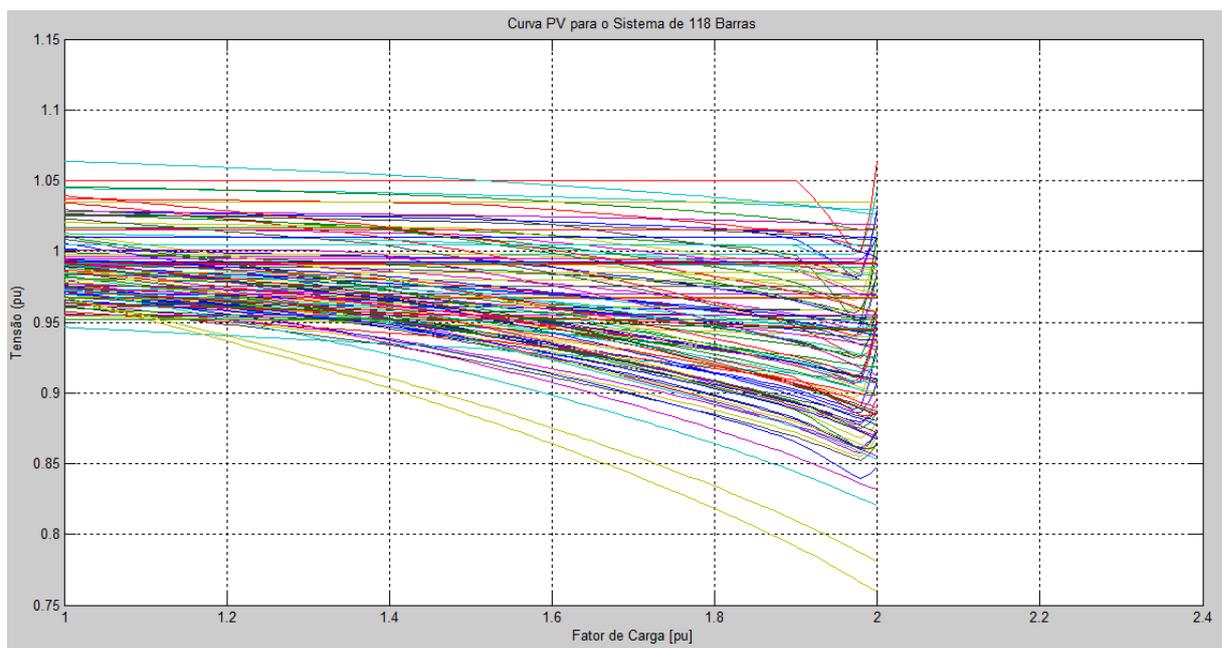
Figura 21 – Sistema de 118 barras.



Fonte: SANTOS, 2013.

Na figura 22, tem-se a curva PV para o sistema de 118 barras. A margem de carga encontrada para este sistema foi de 2.00 [PU].

Figura 22 – Curva PV para o sistema de 118 barras.



Fonte: próprio autor.

3.3.8 MARGEM DE CARGA DOS SISTEMAS

A tabela 2 apresenta um resumo dos valores de margem de carga obtidos para cada um dos sistemas simulados:

Tabela 2- Margem de carga com inserção de linhas de transmissão no Sistema de 3 Barras

Sistema	Margem de carga [PU]
3 Barras	4.94
6 Barras	1.98
9 Barras	1.55
14 Barras	1.93
30 Barras	1.55
57 Barras	1.37
118 Barras	2.00

Fonte: próprio autor.

Verifica-se que cada sistema simulado possui uma margem de carga específica, que varia com o número de barras do sistema e suas características. Como a margem de carregamento é uma questão importante não só no quesito de segurança dos sistemas elétricos, mas também com relação à quantidade de serviço ofertado pelas concessionárias de energia, a aplicação de ações de controle para elevar essa margem se torna importante.

3.4 AÇÕES DE CONTROLE

A seguir é apresentada a metodologia das três ações de controle aplicadas neste trabalho:

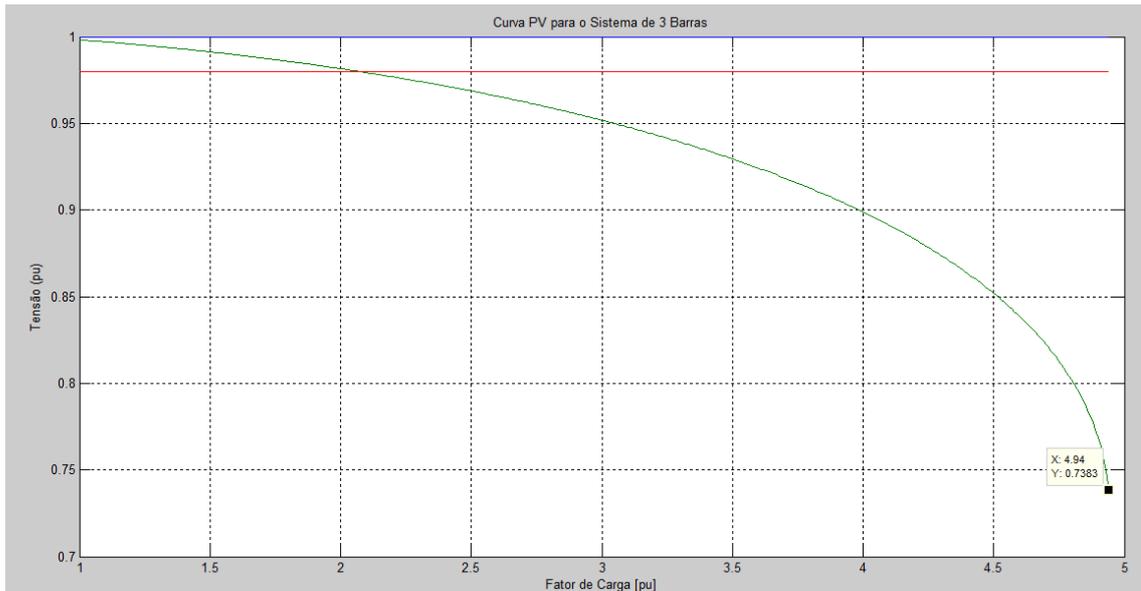
- Inserção de linhas de transmissão no sistema;
- Inserção de capacitor shunt;
- Aumento de tensão dos geradores.

3.4.1 INSERÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO NO SISTEMA

A primeira técnica apresentada trata-se de adicionar linhas de transmissão em paralelo com as linhas já existentes no sistema. Sabe-se que esta ação é um procedimento a ser implantado em longo prazo, uma vez que demanda um estudo econômico e ambiental para que a mesma possa ser feita. No entanto, a justificativa para aplicar esta medida parte do princípio que, com a inclusão de uma nova linha, diminui-se a distância elétrica no transporte de potência, e com isso espera-se que a margem de carga do sistema aumente.

Para efetuar essa ação observou-se as curvas PV's geradas na seção 3.3 e identificou-se o barramento que apresenta o menor nível de tensão no ponto de máximo carregamento. Conforme apresentado no item 2.8, o ponto crítico é dado pelo ponto de inflexão na curva e como mostrado na figura 23, no sistema de 3 barras seu ponto crítico é encontrado na curva verde conforme mostrado abaixo:

Figura 23 – Ponto crítico de tensão para o sistema de 3 barras.



Fonte: próprio autor.

De posse do barramento crítico do sistema, são inseridas novas linhas de transmissão ao mesmo. Ressalta-se que para a inserção de linhas nos outros sistemas testados foi feito o mesmo procedimento.

3.4.2 INSERÇÃO DE CAPACITOR SHUNT NO SISTEMA

A segunda técnica aplicada neste trabalho se trata de inserir um capacitor shunt nos sistemas. A utilização deste elemento diminui a corrente exigida pela linha e, assim, têm-se menores quedas de tensões. Além disso, a inserção de capacitores proporciona (VALE, 2016):

- Aumento da capacidade de transmissão de potência da linha;
- Aumento da estabilidade do sistema, gerada pela diminuição do ângulo devido à reatância;
- Diminuição da queda de tensão no percurso da linha de transmissão;
- Redução das perdas globais do sistema.

No entanto, vale citar que a utilização deste elemento com o propósito de compensar o sistema resulta em sérios riscos quanto à proteção do sistema elétrico, onde o elemento mais afetado se trata dos relés de distância devido ao mesmo ser extremamente dependente da impedância da linha de transmissão. Os maiores problemas que a inserção de capacitores trazem ao sistema são (THOMAS, 2016):

- Variação no alcance;
- Inversão da corrente;
- Frequências sub-harmônicas.

Entretanto, as vantagens apresentadas pela técnica são mais significativas do que as desvantagens relatadas, visto que sua contribuição faz com que não seja necessária a construção de novas linhas de transmissão no intuito de obter uma melhor resposta do sistema como mostrado no tópico anterior. Outro ponto importante é com relação ao seu custo de instalação, que é relativamente menor do que construir uma nova linha. Esta ação se mostra mais vantajosa também quando se compara o tempo para sua aplicação e o seu impacto ao meio ambiente. Em ambos os fatores a inserção de capacitores se mostra mais viável do que a inserção de novas linhas no sistema.

A metodologia utilizada na simulação desta etapa foi adicionar um capacitor nas barras PQ's partindo de um valor mínimo de $j0,10$ [PU] até um valor máximo de $j1,00$ [PU] observando, assim, qual o comportamento do sistema dado essa variação.

3.4.3 VARIAÇÃO DE TENSÃO DOS GERADORES DOS SISTEMAS

A terceira técnica utilizada para verificar a resposta da margem de carga se dá pelo aumento gradual da tensão dos geradores. Sabe-se que em condições normais de operação, a magnitude de tensão (V) na barra aumenta com o crescimento da injeção de potência reativa (Q). No entanto, quando a tensão (V) diminui, com o aumento da injeção de potência reativa em qualquer uma das barras do sistema, o mesmo pode ser considerado instável (MATOS, 2016).

Apesar da instabilidade de tensão ser um problema localizado, ela pode impactar o sistema todo e se espalhar, dependendo da relação entre a potência ativa (P) transmitida e a possibilidade de injeção de potência reativa (Q). Este relacionamento explicita uma regra importante na análise de estabilidade e pode ser mostrada graficamente. Para a transferência de potência ativa P de uma região do sistema para outra, avalia-se os efeitos no perfil de

tensão (V) do sistema estudado. Esta análise é chamada de estudo da curva PV. Como visto na figura 7 e 8, a curva PV se dá pela variação da tensão numa barra em particular como função da variação de potência ativa total do sistema, conclui-se então que a tensão é fator fundamental para determinação da margem de carga dos sistemas (SANTOS, 2006).

O controle de tensão nos terminais de uma unidade geradora foi escolhido por ser uma técnica de fácil utilização, uma vez que não necessita inserir nenhum novo equipamento no sistema, reduzindo assim o gasto necessário para aplicação da mesma. Este controle normalmente é feito por um regulador automático que induz mudanças na corrente de excitação do gerador, de maneira a manter a tensão a níveis constantes almejados. Quando a tensão decresce abaixo de um ponto de ajuste, aumenta-se a corrente de excitação fazendo com que o gerador passe a suprir mais potência reativa, sem alterar significativamente a produção de potência ativa. Por outro lado, se a tensão nos terminais ultrapassar certo valor estabelecido, o regulador reduz a corrente de excitação, fazendo com que a geração de reativo também diminua.

Sendo assim a técnica de controle da tensão dos geradores aplicada neste trabalho consiste em ajustar a tensão de todas as máquinas geradoras de maneira que o limite de tensão seja fixado em 1.10 [PU]. Para os sistemas utilizados, a tensão nos geradores variou-se entre 0.97 a 1 [PU], logo alterou-se este valor com uma mudança de passo de 0.01 [PU] e observou-se qual a resposta da margem de carga dos sistemas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados com a aplicação das ações de controle descritas no capítulo anterior.

4.1 INSERÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

4.1.1 SISTEMA DE 3 BARRAS

Aplicando a ação de controle no sistema de 3 barras os resultados de margem de carga são apresentados na tabela 3:

Tabela 3 - Margem de carga com inserção de linhas de transmissão no Sistema de 3 Barras

Número de linhas adicionadas em Paralelo	Margem de Carga [PU]
1	7.46
2	8.91
3	9.96

Fonte: próprio autor.

A tabela 2 mostra que a margem de carga do sistema de 3 barras sem nenhuma ação de controle é de 4.94 [PU]. Nota-se que este sistema responde de forma positiva para a primeira ação de controle. Para as três linhas o sistema conseguiu aumentar sua margem de carga.

4.1.2 SISTEMA DE 6 BARRAS

Aplicando a ação de controle no sistema de 6 barras os resultados de margem de carga são apresentados na tabela 4:

Tabela 4 – Margem de carga com inserção de linhas de transmissão no Sistema de 6 Barras

Numero de linhas adicionadas em Paralelo	Margem de Carga [PU]
1	2.17
2	2.29
3	2.38

Fonte: próprio autor.

Comparando os resultados da tabela 4 com a margem de carga do sistema de 6 barras apresentado na tabela 2 que é de 1.98 [PU], observa-se que a margem de carga do sistema para ambas as linhas inseridas foi aumentada.

4.1.3 SISTEMA DE 9 BARRAS

Aplicando a ação de controle no sistema de 9 barras os resultados de margem de carga são apresentados na tabela 5:

Tabela 5 – Margem de carga com a inserção de linhas de transmissão no Sistema de 9 Barras

Numero de linhas adicionadas em Paralelo	Margem de Carga [PU]
1	1.69
2	1.81
3	1.92

Fonte: próprio autor.

Observa-se, que apesar de pequena, a margem de carga do sistema de 9 barras foi aumentada para os três casos testados, tendo como base de comparação a margem de carga inicial do sistema de 1.55 [PU] apresentada na tabela 2.

4.1.4 SISTEMA DE 14 BARRAS

Aplicando a ação de controle no sistema de 14 barras os resultados de margem de carga são apresentados na tabela 6:

Tabela 6 – Margem de carga com inserção de linhas de transmissão no Sistema de 14 Barras

Numero de linhas adicionadas em Paralelo	Margem de Carga [PU]
1	1.93
2	1.94
3	1.94

Fonte: próprio autor.

Para o sistema de 14 barras a ação de controle efetuada não se mostrou eficaz, visto que com a inserção da primeira linha o sistema manteve a mesma margem de carga inicial e, na sequência, a resposta se manteve bem próxima do valor original de 1.93 [PU]. Observa-se que, como as linhas foram adicionadas no local de menor tensão, o novo fluxo de potência obteve um equilíbrio entre as tensões das barras. Com isso, o efeito da inserção de novas linhas foi anulado devido à diminuição do fluxo entre as barras, mantendo a margem de carga deste sistema praticamente a mesma.

4.1.5 SISTEMA DE 30 BARRAS

Aplicando a ação de controle no sistema de 30 barras os resultados de margem de carga são apresentados na tabela 7:

Tabela 7 – Margem de carga com inserção de linhas de transmissão no sistema de 30 Barras

Numero de linhas adicionadas em Paralelo	Margem de Carga [PU]
1	1.56
2	1.56
3	1.56

Fonte: próprio autor.

Semelhante ao que aconteceu no sistema de 14 barras, no sistema de 30 barras a inserção de linhas não foi capaz de alterar de forma significativa o valor da margem de carga do sistema, visto que segundo a tabela 2 a margem de carga original do sistema é de 1.55 [PU]. A razão disto se dá na mudança do sentido do fluxo de potência com as linhas inseridas. As linhas inseridas na região de menor tensão geram um equilíbrio no fluxo resultante, mantendo a margem de carga inalterada.

4.1.6 SISTEMA DE 57 BARRAS

Aplicando a ação de controle no sistema de 57 barras os resultados de margem de carga são apresentados na tabela 14:

Tabela 8 – Margem de carga com inserção de linhas de transmissão no Sistema de 57 Barras

Numero de linhas adicionadas em Paralelo	Margem de Carga [PU]
1	1.37
2	1.38
3	1.38

Fonte: próprio autor.

Nota-se que a técnica não é eficaz para o sistema de 57 barras, onde a margem de carga se manteve sem grande alteração e próxima do valor original de 1.37 [PU] independentemente da quantidade de linhas que foram adicionadas ao sistema. A razão disto é decorrente do mesmo fator ocorrido nos sistemas de 14 e 30 barras onde o fluxo de potência teve o sentido alterado fazendo com que a margem de carga se mantenha próxima do valor original, uma vez que a vantagem trazida com a inserção da linha de transmissão se anule com a mudança do sentido do fluxo no sistema.

4.1.7 SISTEMA DE 118 BARRAS

Aplicando a ação de controle no sistema de 118 barras os resultados de margem de carga são apresentados na tabela 9:

Tabela 9 – Margem de carga com inserção de linhas de transmissão no Sistema de 118 Barras

Numero de linhas adicionadas em Paralelo	Margem de Carga [PU]
1	2.00
2	2.00
3	2.00

Fonte: próprio autor.

Observa-se que a margem de carga ficou estagnada no valor original mesmo ocorrendo o aumento do número de linhas de transmissão do sistema.

Analisando os resultados obtidos com a aplicação da primeira ação de controle, nota-se que a mesma se mostrou eficaz para os sistemas menores, visto que a inserção de linhas nesses sistemas traz uma maior influência na resposta dos mesmos, enquanto que nos sistemas maiores, a resposta do sistema é pouco alterada com a utilização desta técnica. O motivo para isso se dá pela robustez do sistema. Sendo assim, não se justifica a utilização desta técnica para sistemas maiores, uma vez que a resposta apresentada não compensará o investimento e mão de obra que será necessário.

4.2 INSERÇÃO DE CAPACITOR SHUNT

4.2.1 SISTEMA DE 3 BARRAS

Realizando esta ação para o sistema de 3 barras, o resultado encontrado para margem de carga segue na tabela 10:

Tabela 10 – Margem de carga com inserção de capacitor no Sistema de 3 Barras

Valor do capacitor shunt j [PU]	Margem de Carga [PU]
0.1	5.08
0.2	5.23
0.3	5.40
0.4	5.59
0.5	5.79
0.6	6.02
0.7	6.28
0.8	6.56
0.9	6.89
1.0	1.14

Fonte: próprio autor.

Observa-se que, com o aumento gradual do valor da capacitância inserida, a margem de carga consegue ser elevada, porém ao utilizar o valor de $j1$ [PU] de capacitância, a margem de carga apresenta uma queda. Para compreender a causa deste efeito, observou-se os valores de tensão nas barras para o capacitor de $j0.9$ [PU] que foram:

- 1.000 [PU], 1.283 [PU] e 0.9800 [PU].

Como o capacitor foi inserido apenas nas barras PQ's, no sistema de 3 barras apenas uma barra se aplica a este caso, nota-se que esta barra apresenta o valor de 1,283 [PU]. Porém, quando se observa o valor de tensão nas barras para o último valor de capacitância inserida, tem-se:

- 1.0000 [PU], 0.0710 [PU] e 0.9800 [PU].

Observa-se que a tensão na barra 2 apresentou uma grande queda, que pode ter sido causada por uma sobrecorrente.

4.2.2 SISTEMA DE 6 BARRAS

Realizando esta manobra para o sistema de 6 barras, o resultado encontrado para margem de carga segue na tabela 11:

Tabela 11 – Margem de carga com inserção de capacitor no Sistema de 6 Barras

Valor do capacitor shunt j [PU]	Margem de Carga [PU]
0.1	2.02
0.2	2.06
0.3	2.10
0.4	2.15
0.5	2.19
0.6	2.24
0.7	2.29
0.8	2.34
0.9	2.39
1.0	2.45

Fonte: próprio autor.

Nota-se que o sistema de 6 barras responde de forma positiva a técnica utilizada, conseguindo elevar sua margem de carga quando comparada com a margem original da tabela 4.

4.2.3 SISTEMA DE 9 BARRAS

Realizando esta manobra para o sistema de 9 barras, o resultado encontrado para margem de carga segue na tabela 12:

Tabela 12 – Margem de carga com inserção de capacitor no Sistema de 9 Barras

Valor do capacitor shunt j[PU]	Margem de Carga [PU]
0.1	1.71
0.2	1.91
0.3	1.68
0.4	1.10
0.5	1.49
0.6	2.03
0.7	2.83
0.8	4.07
0.9	6.23
1.0	10.44

Fonte: próprio autor.

A resposta do sistema de 9 barras com a inserção do capacitor foi positiva. A margem de carga chegou a um valor aproximadamente seis vezes maior dado a variação da capacitância. Nota-se que entre o valor de 0.3 e 0.4 [PU] o fluxo de potência apresentou uma queda na margem de carga sendo esse fator justificado pela variação de tensão nas barras. As tensões nas barras para o valor de j0.2[PU] como mostrado na tabela 13 foram:

Tabela 13 - Valores de tensão nas barras

Barra do Sistema	Valor de Tensão [PU]
1	1.0000
2	1.1388
3	1.1592
4	1.0060
5	0.9705
6	1.0135
7	1.1076
8	1.1005
9	1.1364

Fonte: próprio autor.

Ressalta-se que, a partir da barra 4, todas as barras seguintes são barras PQ e receberam um capacitor shunt instalado. Já os valores de tensão nas barras para a capacitância de j0.3 [PU] segundo a tabela 14 foram:

Tabela 14 - Valor de tensão nas barras

Barra do Sistema	Valor de Tensão [PU]
1	1.0000
2	1.2049
3	1.0813
4	1.0376
5	1.0397
6	1.0441
7	1.1710
8	1.1407
9	1.1166

Fonte: próprio autor.

O aumento dos valores de tensão nas barras para a capacitância de $j0.3$ [PU] faz com que a diferença de potencial entre as barras interligadas diminua, gerando assim a queda de fluxo entre essas barras. Com isso, o fluxo tem que ser maior entre as outras barras, gerando uma sobrecarga nestes locais e contribuindo para que a margem de carga diminua. Em sequência, quando um novo valor de capacitância é inserido ocorre o desbalanceio entre as tensões nas barras, com isso o fluxo de potência volta a ter maior incidência aumentando a margem de carga.

4.2.4 SISTEMA DE 14 BARRAS

Aplicando a ação de controle no sistema de 14 barras, os resultados de margem de carga obtidos são descritos na tabela 15:

Tabela 15 – Margem de carga com inserção de capacitor no Sistema de 14 Barras

Valor do capacitor shunt j [PU]	Margem de Carga [PU]
0.1	2.17
0.2	2.45
0.3	2.82
0.4	2.84
0.5	2.91
0.6	2.95
0.7	3.00
0.8	3.03
0.9	3.05
1.0	3.05

Fonte: próprio autor.

A resposta do sistema de 14 barras para a inserção de capacitor foi positiva, elevando a margem de carga com a ação de controle utilizada. Ressalta-se que a margem de carga inicial sem utilização da ação de controle é de 1.94 [PU].

4.4.5 SISTEMA DE 30 BARRAS

Aplicando a técnica no sistema de 30 barras o resultado da margem de carga deste sistema é mostrado na tabela 16:

Tabela 16 – Margem de carga com a inserção de capacitor no Sistema de 30 Barras

Valor do capacitor shunt j [PU]	Margem de Carga [PU]
0.1	1.40
0.2	2.20
0.3	Divergiu

Fonte: próprio autor.

A ação de controle aplicada no sistema de 30 barras não se mostrou eficaz. Para os dois primeiros valores testados a margem de carga do sistema apresentou uma elevação, porém, logo em seguida não conseguiu encontrar um ponto operativo.

4.4.6 SISTEMA DE 57 BARRAS

Aplicando o procedimento no sistema de 57 barras, a tabela 17 trás a resposta do sistema:

Tabela 17 – Margem de carga com inserção de capacitor no Sistema de 57 Barras

Valor do capacitor shunt j [PU]	Margem de Carga [PU]
0.1	1.45
0.2	Divergiu

Fonte: próprio autor.

Semelhante ao ocorrido no sistema de 30 barras, a resposta do sistema de 57 barras com aplicação da ação de controle utilizando inserção de capacitor shunt não foi satisfatória. Apesar do aumento da margem de carga para o primeiro valor testado, logo em sequência o sistema não conseguiu convergir para nenhum valor de capacitância inserida.

4.4.7 SISTEMA DE 118 BARRAS

Aplicando a técnica no sistema de 118 barras, foram obtidos os seguintes resultados de margem de carga descritos na tabela 18:

Tabela 18 – Margem de carga com inserção de capacitor no Sistema de 118 Barras

Valor do capacitor shunt j[PU]	Margem de Carga [PU]
0.1	2.00
0.2	2.08
0.3	2.09
0.4	1.99
0.5	1.92
0.6	1.30
0.7	1.26
0.8	Divergiu

Fonte: próprio autor.

Para este sistema a inserção do capacitor se mostrou eficaz para os primeiros valores de capacitância, porém entre 0.4 e 0.7 [PU] a resposta do sistema foi contrária ao esperado devido ao valor de tensão adquirido pelas barras PQ's. Para estes valores ocorreu o problema já explicado anteriormente, onde o equilíbrio de tensão entre as barras faz com que o fluxo de potência entre as mesmas diminua, fazendo com que a margem de carga também decresça. Em seguida o sistema não encontrou pontos operativos.

A simulação da segunda ação de controle aplicada neste estudo mostrou-se oscilante, obtendo maior eficácia nos sistemas maiores ao contrário do que aconteceu com a inserção de linhas de transmissão. Nota-se que, como a inserção do capacitor shunt ocorreu apenas em algumas barras do sistema (PQ's), dependendo do valor inserido, pode haver uma resposta contrária da margem de carga do sistema, e com isso a ação de controle que tem como objetivo aumentar a margem de carga pode causar a queda da mesma.

4.3 AUMENTO DE TENSÃO DOS GERADORES

4.3.1 SISTEMA DE 3 BARRAS

Aplicando este procedimento para o sistema de 3 barras, a margem de carga pode ser analisada na tabela 19:

Tabela 19 – Margem de carga com variação de tensão dos geradores no Sistema de 3 Barras

Tensão nos Geradores [PU]	Margem de Carga [PU]
1.0	4.94
1.01	5.04
1.02	5.14
1.03	5.24
1.04	5.34
1.05	5.44
1.06	5.55
1.07	5.65
1.08	5.76
1.09	5.86
1.10	5.97

Fonte: próprio autor.

Analisando os novos valores de margem de carga, constata-se que a técnica é eficiente para o sistema de 3 barras, pois em todos os valores de tensão inseridos a margem de carga elevou o seu valor.

4.3.2 SISTEMA DE 6 BARRAS

Aplicando este procedimento para o sistema de 6 barras, a margem de carga pode ser analisada na tabela 20:

Tabela 20 – Margem de carga com variação de tensão dos geradores no Sistema de 6 Barras

Fator de Multiplicação	Margem de Carga [PU]
1.01	2.02
1.02	2.06
1.03	2.10
1.04	2.14
1.05	2.18
1.06	2.22
1.07	2.26
1.08	2.31
1.09	2.35
1.10	2.39

Fonte: próprio autor.

A resposta do sistema de 6 barras com esta ação de controle se mostra positiva. O sistema mantém a estabilidade para todos os valores de tensão testados e conseguiu aumentar a margem de carga do sistema para todas as possibilidades aplicadas.

4.3.3 SISTEMA DE 9 BARRAS

Aplicando este procedimento para o sistema de 9 barras, a margem de carga pode ser analisada na tabela 21:

Tabela 21 – Margem de carga com variação de tensão dos geradores no Sistema de 9 Barras

Fator de Multiplicação	Margem de Carga [PU]
1.01	1.57
1.02	1.59
1.03	1.61
1.04	1.63
1.05	1.66
1.06	1.68
1.07	1.70
1.08	1.72
1.09	1.75
1.10	1.77

Fonte: próprio autor.

Os resultados para o sistema de 9 barras com essa ação de controle são positivos, em todos os valores de tensão dos geradores testados a margem de carga sofreu um aumento.

4.3.4 SISTEMA DE 14 BARRAS

Aplicando este procedimento para o sistema de 14 barras, a margem de carga pode ser analisada na tabela 22:

Tabela 22 – Margem de carga com variação de tensão dos geradores no Sistema de 14 Barras

Fator de Multiplicação	Margem de Carga [PU]
1.01	1.96
1.02	1.99
1.03	2.02
1.04	2.05
1.05	2.08
1.06	2.12
1.07	2.15
1.08	2.18
1.09	2.21
1.10	2.25

Fonte: próprio autor.

A resposta do sistema de 14 barras também é positiva, aumentando sua margem de carga para todos os valores testados.

4.3.5 SISTEMA DE 30 BARRAS

Aplicando este procedimento para o sistema de 30 barras, a margem de carga pode ser analisada na tabela 23:

Tabela 23 – Margem de carga com variação de tensão dos geradores no Sistema de 30 Barras

Fator de Multiplicação	Margem de Carga [PU]
1.01	1.58
1.02	1.60
1.03	1.62
1.04	1.65
1.05	1.67
1.06	1.70
1.07	1.60
1.08	1.62
1.09	1.65
1.10	1.67

Fonte: próprio autor.

Observa-se que a margem de carga do sistema de 30 barras é melhorada para todos os valores de tensões aplicadas nos geradores do sistema.

4.3.6 SISTEMA DE 57 BARRAS

Aplicando este procedimento para o sistema de 57 barras, a margem de carga pode ser analisada na tabela 24:

Tabela 24 – Margem de carga com variação de tensão dos geradores no Sistema de 57 Barras

Fator de Multiplicação	Margem de Carga [PU]
1.01	1.39
1.02	1.42
1.03	1.44
1.04	1.47
1.05	1.49
1.06	1.52
1.07	1.55
1.08	1.58
1.09	1.60
1.10	1.63

Fonte: próprio autor.

Seguindo o que aconteceu nos sistemas anteriores, o sistema de 57 barras também responde de forma positiva ao aumento da tensão dos geradores, conseguindo elevar sua margem de carga nos testes realizados.

4.3.7 SISTEMA DE 118 BARRAS

Aplicando este procedimento para o sistema de 118 barras, a margem de carga pode ser analisada na tabela 25:

Tabela 25 – Margem de carga com variação de tensão dos geradores no Sistema de 118 Barras

Fator de Multiplicação	Margem de Carga [PU]
1.01	2.02
1.02	2.04
1.03	2.06
1.04	2.08
1.05	2.10
1.06	2.12
1.07	2.14
1.08	2.17
1.09	2.19
1.10	2.19

Fonte: próprio autor.

Como era de se esperar, o sistema de 118 barras também responde bem ao aumento de tensão dos geradores elevando sua margem de carga em todos os testes realizados.

Analisando as três técnicas aplicadas, nota-se que ambas as técnicas empregadas mostram resultados satisfatórios, no entanto a escolha específica de uma delas requer certo estudo para atender os resultados esperados. A técnica de controle envolvendo inserção de linhas de transmissão se mostrou superior às outras em sistemas menores, elevando a margem de carga mais significativamente. A resposta dos sistemas quanto à utilização da técnica de inserção de um capacitor shunt na linha mostrou-se instável, não sendo garantido que o aumento da capacitância ou até mesmo a inserção de um capacitor de baixo valor irá melhorar a margem de carga do sistema. Já a ação de controle utilizando o aumento da tensão dos geradores mostrou-se a mais constante, mesmo não apresentando resultados de aumento da margem de carga tão elevados como com a técnica utilizando inserção de linhas, ela foi à única que conseguiu elevar, mesmo que em menor valor, a margem de carga de todos os sistemas simulados.

4.4 JUNÇÃO DAS TÉCNICAS DE AUMENTO DA MARGEM DE CARGA

Com intuito de validar de forma mais satisfatória as três técnicas de controle apresentadas no capítulo três para aumento do valor da margem de carga dos sistemas simulados, neste capítulo aplica-se as mesmas técnicas, no entanto, agora em conjunto, onde o

objetivo é analisar ao adicionar duas ou mais técnicas ao mesmo tempo em um determinado sistema, qual será o comportamento da sua margem de carga. Sendo assim, as simulações foram divididas em três etapas:

- Inserção de linhas de transmissão juntamente com a inserção de um capacitor shunt;
- Aumento da tensão dos geradores juntamente com a inserção de linhas de transmissão;
- Inserção de linhas de transmissão em paralelo, inserção de um capacitor shunt e aumento da tensão dos geradores.

Salienta-se que a escolha das combinações das técnicas e o modo como às mesmas foram feitas, baseou-se em extrair os melhores resultados das simulações apresentadas no capítulo três, e unifica-las.

4.5 INSERÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO JUNTAMENTE COM A INSERÇÃO DE UM CAPACITOR SHUNT.

Para realizar este conjunto de técnicas, utilizou-se a inserção de três linhas em todas as simulações deste tópico, enquanto que o capacitor inserido seguiu o mesmo procedimento anterior, variando sua capacitância de 0.1 até 1.0 [PU].

4.5.1 TÉCNICA APLICADA NO SISTEMA DE 3 BARRAS

Aplicando o procedimento para o sistema de 3 barras o resultado pode ser observado na tabela 26:

Tabela 26 – Margem de carga com inserção de linhas e capacitor no Sistema de 3 Barras

Capacitância j[PU]	LT's em Paralelo	Margem de Carga [PU]
0.1	3	10.16
0.2	3	10.30
0.3	3	10.45
0.4	3	10.59
0.5	3	10.74
0.6	3	10.89
0.7	3	11.05
0.8	3	11.21
0.9	3	11.37
1.0	3	11.54

Fonte: próprio autor.

Para este conjunto de ações nota-se que a margem de carga do sistema se eleva consideravelmente.

4.5.2 TÉCNICA APLICADA NO SISTEMA DE 6 BARRAS

Aplicando o procedimento para o sistema de 6 barras o resultado pode ser observado na tabela 27:

Tabela 27 – Margem de carga com inserção de linhas e capacitor no Sistema de 6 Barras

Capacitância j[PU]	LT's em Paralelo	Margem de Carga [PU]
0.1	3	2.42
0.2	3	2.47
0.3	3	2.52
0.4	3	2.57
0.5	3	2.62
0.6	3	2.67
0.7	3	2.73
0.8	3	2.79
0.9	3	2.85
1.0	3	2.91

Fonte: próprio autor.

O sistema de 6 barras responde forma positiva com a utilização das duas técnicas, apresentando margem de carga superior ao que foi encontrado com a aplicação das técnicas separadas.

4.5.3 TÉCNICA APLICADA NO SISTEMA DE 9 BARRAS

Aplicando o procedimento para o sistema de 9 barras o resultado pode ser observado na tabela 28:

Tabela 28 – Margem de carga com inserção de linhas e capacitor no Sistema de 9 Barras

Capacitância j[PU]	LT's em Paralelo	Margem de Carga [PU]
0.1	3	2.06
0.2	3	1.75
0.3	3	Divergiu

Fonte: próprio autor.

Nota-se que esse conjunto de técnicas aplicadas no sistema de 9 barras se mostra inviável. Logo para a segunda simulação, houve uma queda na tensão das barras do sistema,

gerando assim a diminuição da margem de carga. Em sequência o sistema já não apresentou estabilidade.

4.5.4 TÉCNICA APLICADA NO SISTEMA DE 14 BARRAS

Aplicando o procedimento para o sistema de 14 barras o resultado pode ser observado na tabela 29:

Tabela 29 – Margem de carga com inserção de linhas e capacitor no Sistema de 14 Barras

Capacitância j[PU]	LT's em Paralelo	Margem de Carga [PU]
0.1	3	2.18
0.2	3	2.46
0.3	3	2.83
0.4	3	2.85
0.5	3	2.91
0.6	3	2.96
0.7	3	3.02
0.8	3	3.06
0.9	3	3.08
1.0	3	3.08

Fonte: próprio autor.

O sistema de 14 barras responde bem a junção de técnicas feita, tendo sua margem de carga aumentada para os valores testados.

4.5.5 TÉCNICA APLICADA NO SISTEMA DE 30 BARRAS

Aplicando esta técnica para o sistema de 30 barras o resultado pode ser observado na tabela 30:

Tabela 30 – Margem de carga com inserção de linhas e capacitor no Sistema de 30 Barras

Capacitância j[PU]	LT's em Paralelo	Margem de Carga [PU]
0.1	3	1.80
0.2	3	2.21
0.3	3	2.21
0.4	3	Divergiu

Fonte: próprio autor.

O sistema de 30 barras não respondeu bem a técnica de controle aplicada, apresentando divergência após o valor de $j0.4[PU]$. Nota-se que todo sistema tem seu limite

de valores para estabilidade, então mesmo aplicando duas técnicas para melhora da resposta, não é garantido que a junção das mesmas trará um resultado positivo.

4.5.6 TÉCNICA APLICADA NO SISTEMA DE 57 BARRAS

Aplicando esta técnica para o sistema de 57 barras o resultado pode ser observado na tabela 31:

Tabela 31 – Margem de carga com inserção de linhas e capacitor no Sistema de 57 Barras

Capacitância j[PU]	LT's em Paralelo	Margem de Carga [PU]
0.1	3	1.45
0.2	3	1.46
0.3	3	Divergiu

Fonte: próprio autor.

O sistema de 57 barras apresenta uma resposta ruim quando lhe é aplicado esta junção de técnicas, apresentando grande instabilidade não obtendo sucesso em aumentar sua margem de carga.

4.5.7 TÉCNICA APLICADA NO SISTEMA DE 118 BARRAS

Aplicando esta técnica para o sistema de 118 barras o resultado pode ser observado na tabela 32:

Tabela 32 – Margem de carga com inserção de linhas e capacitor no Sistema de 118 Barras

Capacitância j[PU]	LT's em Paralelo	Margem de Carga [PU]
0.1	3	2.08
0.2	3	2.09
0.3	3	1.98
0.4	3	1.97
0.5	3	Divergiu

Fonte: próprio autor.

Percebe-se que para este sistema, a junção das técnicas se mostra ineficaz, o aumento da capacitância inserida nas barras PQ's contribuiu para a diminuição do fluxo entre essas linhas, fazendo com que a margem de carga diminua, mantendo-se em queda até que o sistema divergisse. Conclui-se então que para este sistema a técnica usada não é viável.

4.6 AUMENTO DA TENSÃO DOS GERADORES E INSERÇÃO DE CAPACITOR SHUNT

Para realizar este conjunto de técnicas, variou-se a tensão dos geradores juntamente com a adição de um capacitor, de maneira a observar qual foi o impacto na margem de carga do sistema. A tensão dos geradores foi alterada partindo de 1.01 até 1.10 [PU], enquanto que a capacitância foi variada de 0.1 até 1.0 [PU].

4.6.1 TÉCNICA APLICADA NO SISTEMA DE 3 BARRAS

Aplicando este procedimento para o sistema de 3 barras o resultado pode ser observado na tabela 33:

Tabela 33 – Margem de carga com variação de tensão dos geradores e inserção de capacitor no Sistema de 3 Barras

Fator de Multiplicação	Valor da Capacitância j[PU]	Margem de Carga [PU]
1.01	0.1	5.18
1.02	0.2	5.44
1.03	0.3	5.73
1.04	0.4	6.04
1.05	0.5	6.38
1.06	0.6	6.76
1.07	0.7	7.18
1.08	0.8	7.65
1.09	0.9	8.17
1.10	1.0	8.17

Fonte: próprio autor.

Observa-se que o sistema responde de forma positiva a junção das duas ações de controle conseguindo elevar sua margem de carga consideravelmente.

4.6.2 TÉCNICA APLICADA NO SISTEMA DE 6 BARRAS

Aplicando este procedimento para o sistema de 6 barras o resultado pode ser observado na tabela 34:

Tabela 34 – Margem de carga com variação de tensão dos geradores e inserção de capacitor no Sistema de 6 Barras

Fator de Multiplicação	Valor da Capacitância j[PU]	Margem de Carga [PU]
1.01	0.1	2.06
1.02	0.2	2.14
1.03	0.3	2.23
1.04	0.4	2.32
1.05	0.5	2.42
1.06	0.6	2.52
1.07	0.7	2.62
1.08	0.8	2.73
1.09	0.9	2.84
1.10	1.0	2.96

Fonte: próprio autor.

O sistema de 6 barras se comportou bem com a utilização desta junção de técnicas de controle, elevando sua margem de carga em todos os testes feitos, conseguindo manter sua estabilidade.

4.6.3 TÉCNICA APLICADA NO SISTEMA DE 9 BARRAS

Aplicando este procedimento para o sistema de 9 barras o resultado pode ser observado na tabela 35:

Tabela 35 – Margem de carga com variação de tensão dos geradores e inserção de capacitor no Sistema de 9 Barras

Fator de Multiplicação	Valor da Capacitância j[PU]	Margem de Carga [PU]
1.01	0.1	1.73
1.02	0.2	1.96
1.03	0.3	Divergiu

Fonte: próprio autor.

O sistema começa respondendo bem a aplicação das técnicas, porém logo em seguida não consegue encontrar um ponto operativo para os valores aplicados.

4.6.4 TÉCNICA APLICADA NO SISTEMA DE 14 BARRAS

Aplicando o procedimento para o sistema de 14 barras o resultado pode ser observado na tabela 36:

Tabela 36 – Margem de carga com variação de tensão dos geradores e inserção de capacitor no Sistema de 14 Barras

Fator de Multiplicação	Valor da Capacitância j[PU]	Margem de Carga [PU]
1.01	0.1	2.21
1.02	0.2	2.53
1.03	0.3	2.97
1.04	0.4	3.04
1.05	0.5	3.17
1.06	0.6	3.28
1.07	0.7	3.39
1.08	0.8	3.49
1.09	0.9	3.57
1.10	1.0	3.61

Fonte: próprio autor.

O sistema de 14 barras responde muito bem a este conjunto de técnicas elevando sua margem de carga de forma satisfatória.

4.6.5 TÉCNICA APLICADA NO SISTEMA DE 30 BARRAS

Aplicando este procedimento para o sistema de 30 barras o resultado pode ser observado na tabela 37:

Tabela 37 – Margem de carga com variação de tensão dos geradores e inserção de capacitor no Sistema de 30 Barras

Fator de Multiplicação	Valor da Capacitância j[PU]	Margem de Carga [PU]
1.01	0.1	1.56
1.02	0.2	2.27
1.03	0.3	2.30
1.04	0.4	Divergiu

Fonte: próprio autor.

O sistema de 30 barras começa respondendo de forma positiva a implantação das técnicas de controle utilizadas, porém a partir da quarta simulação o sistema chegou ao seu limite de operação e apresentou divergência em seguida, mostrando que para este sistema a técnica apresenta uma grande limitação.

4.6.6 TÉCNICA APLICADA NO SISTEMA DE 57 BARRAS

Aplicando este procedimento para o sistema de 57 barras o resultado pode ser observado na tabela 38:

Tabela 38 – Margem de carga com variação de tensão dos geradores e inserção de capacitor no Sistema de 57 Barras

Fator de Multiplicação	Valor da Capacitância j[PU]	Margem de Carga [PU]
1.01	0.1	1.46
1.02	0.2	1.48
1.03	0.3	Divergiu

Fonte: próprio autor.

O sistema de 57 barras não conseguiu obter melhora significativa na sua margem de carga com a utilização desta combinação de técnicas, chegando à divergência rapidamente. Para este sistema a técnica não pode ser considerada viável.

4.6.7 TÉCNICA APLICADA NO SISTEMA DE 118 BARRAS

Aplicando este procedimento para o sistema de 118 barras o resultado pode ser observado na tabela 39:

Tabela 39 – Margem de carga com variação de tensão dos geradores e inserção de capacitor no Sistema de 118 Barras

Fator de Multiplicação	Valor da Capacitância j[PU]	Margem de Carga [PU]
1.01	0.1	2.03
1.02	0.2	2.11
1.03	0.3	2.17
1.04	0.4	Divergiu

Fonte: próprio autor.

A técnica aplicada ao sistema de 118 barras não consegue manter o aumento da margem de carga, fazendo com que o sistema não encontre ponto operativo com o prosseguir das simulações.

4.7 AUMENTO DA TENSÃO DOS GERADORES, INSERÇÃO DE CAPACITORES SHUNT E INSERÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

O último teste realizado constituiu-se da junção das três técnicas aplicadas neste trabalho. Para isso, adotou-se a inserção de 3 linhas no sistema e nas outras duas técnicas manteve-se o padrão feito nos tópicos anteriores, variando a tensão dos geradores partindo de 1.01 até 1.10 [PU], enquanto que a capacitância foi variada de 0.1 até 1.0 [PU].

- Aplicando a junção das técnicas para o sistema de 3 barras o resultado pode ser observado na tabela 40:

Tabela 40 – Margem de carga com aplicação das três técnicas no Sistema de 3 Barras

Fator de Multiplicação	Capacitância j[PU]	LT's em Paralelo	Margem de Carga [PU]
1.01	0.1	3	7.59
1.02	0.2	3	7.88
1.03	0.3	3	8.19
1.04	0.4	3	8.50
1.05	0.5	3	8.84
1.06	0.6	3	9.18
1.07	0.7	3	9.54
1.08	0.8	3	9.92
1.09	0.9	3	10.31
1.10	1.0	3	10.72

Fonte: próprio autor.

O sistema de 3 barras consegue responder de forma positiva utilizando as três ações de controle juntas, mantendo a estabilidade e um bom aumento da margem de carga do sistema.

- Aplicando a junção das técnicas para o sistema de 6 barras o resultado pode ser observado na tabela 41:

Tabela 41 – Margem de carga com aplicação das três técnicas no Sistema de 6 Barras

Fator de Multiplicação	Capacitância j[PU]	LT's em Paralelo	Margem de Carga [PU]
1.01	0.1	3	2.25
1.02	0.2	3	2.34
1.03	0.3	3	2.44
1.04	0.4	3	2.54
1.05	0.5	3	2.64
1.06	0.6	3	2.74
1.07	0.7	3	2.85
1.08	0.8	3	2.97
1.09	0.9	3	3.09
1.10	1.0	3	3.22

Fonte: próprio autor.

Observa-se que o sistema de 6 barras também responde de forma positiva a implantação das três técnicas aplicadas. A margem de carga do sistema é elevada em ambos os testes.

- Aplicando a junção das técnicas para o sistema de 9 barras o resultado pode ser observado na tabela 42:

Tabela 42 – Margem de carga com aplicação das três técnicas no Sistema de 9 Barras

Fator de Multiplicação	Capacitância j[PU]	LT's em Paralelo	Margem de Carga [PU]
1.01	0.1	3	1.69
1.02	0.2	3	1.69
1.03	0.3	3	1.96
1.04	0.4	3	Divergiu

Fonte: próprio autor.

O sistema de 9 barras apresenta uma boa resposta inicial aos valores inseridos, porém diverge logo em seguida.

- Aplicando a junção das técnicas para o sistema de 14 barras o resultado pode ser observado na tabela 43:

Tabela 43 – Margem de carga com aplicação das três técnicas no Sistema de 14 Barras

Fator de Multiplicação	Capacitância j[PU]	LT's em Paralelo	Margem de Carga [PU]
1.01	0.1	3	2.21
1.02	0.2	3	2.53
1.03	0.3	3	2.97
1.04	0.4	3	3.04
1.05	0.5	3	3.17
1.06	0.6	3	3.28
1.07	0.7	3	3.39
1.08	0.8	3	3.49
1.09	0.9	3	3.57
1.10	1.0	3	3.61

Fonte: próprio autor.

O sistema de 14 barras consegue se adaptar as técnicas implantadas, apresentando elevação da margem de carga e mantendo a estabilidade do sistema para todos os casos simulados.

- Aplicando a junção das técnicas para o sistema de 30 barras o resultado pode ser observado na tabela 44:

Tabela 44 – Margem de carga com aplicação das três técnicas no Sistema de 30 Barras

Fator de Multiplicação	Capacitância j[PU]	LT's em Paralelo	Margem de Carga [PU]
1.01	0.1	3	1.55
1.02	0.2	3	2.30
1.03	0.3	3	Divergiu

Fonte: próprio autor.

Nota-se que o sistema de 30 barras não consegue manter a evolução da margem de carga, chegando ao seu limite de operação e divergindo logo em sequência. A utilização da junção das ações de controle não se mostra viável para este sistema.

- Aplicando a junção das técnicas para o sistema de 57 barras o resultado pode ser observado na tabela 45:

Tabela 45 – Margem de carga com aplicação das três técnicas no Sistema de 57 Barras

Fator de Multiplicação	Capacitância j[PU]	LT's em Paralelo	Margem de Carga [PU]
1.01	0.1	3	1.48
1.02	0.2	3	Divergiu

Fonte: próprio autor.

Conclui-se que o sistema de 57 barras não suporta a implantação de ambas as técnicas aplicadas, tornando as mesmas inviáveis quando utilizadas em conjunto neste sistema.

- Aplicando a junção das técnicas para o sistema de 118 barras o resultado pode ser observado na tabela 46:

Tabela 46 – Margem de carga com aplicação das três técnicas no Sistema de 118 Barras

Fator de Multiplicação	Capacitância j[PU]	LT's em Paralelo	Margem de Carga [PU]
1.01	0.1	3	2.02
1.02	0.2	3	2.10
1.03	0.3	3	2.17
1.04	0.4	3	Divergiu

Fonte: próprio autor.

O sistema de 118 barras não se mostra totalmente eficaz a junção das ações de controle, apresentando divergência logo nos primeiros casos testados, mostrando não ser viável a utilização da junção de técnicas para este sistema.

5. CONCLUSÃO

Com o incessante acréscimo da demanda de energia, é fundamental a qualidade da provisão deste recurso no intuito de procurar que as interrupções em seu fornecimento sejam cada vez mais minimizadas. Por isso, é de suma importância compreender qual é a margem de carga do sistema e inteirar-se do quão próximo o sistema está operando do ponto de colapso, evitando, desta maneira, que o sistema entre em instabilidade. No presente trabalho, foi compreendido e aplicado o método do fluxo de potência continuado no intuito de traçar as curvas PV's para vários sistemas, e através disso observar a eficácia do método, permitindo encontrar o ponto máximo de carga.

Três ações de controle foram apresentadas, levantando duas hipóteses apresentadas a seguir:

- A utilização de uma ação de controle nos sistemas garante um aumento da margem de carga?
- Associar mais de uma ação de controle em um determinado sistema trará uma resposta ainda melhor?

Com auxílio do software MATLAB®, simulou-se essas técnicas analisando, primeiramente, sua influência atuando isoladas nos sistemas e, posteriormente, atuando agrupadas, cumprindo assim com o objetivo proposto. Uma das ações simuladas foi a inserção de capacitor shunt na linha, onde os resultados apresentados no capítulo 4 mostram que capacitores podem trazer um equilíbrio entre as tensões nas barras, fazendo com que o resultado da margem de carga apresente queda e seja o contrário do esperado. Outra técnica vista neste trabalho foi à duplicação das linhas de transmissão, com isso, aumenta-se a capacidade de transmissão de potência e distancia-se o ponto de operação do sistema do ponto de colapso. Entretanto, a técnica se mostrou ineficaz acima de três linhas adicionadas, além disso, a mesma é vista como uma ação para longo prazo, que necessita de planejamento e estudo sobre seu impacto ambiental. A técnica de aumento da tensão dos geradores se mostrou a mais eficiente, sendo capaz de aumentar a margem de carga de todos os sistemas testados. Desta forma, se mostra a frente das outras, uma vez que seus resultados são obtidos sem que seja necessário alterar a estrutura do SEP.

Quando as técnicas foram testadas em conjunto conforme mostrado no capítulo 4, nem sempre o resultado foi de elevação da margem de carga como é esperado, mostrando que a junção de duas ações de controle não garante uma resposta positiva ao sistema. Foi constatado com as simulações feitas neste trabalho que a instalação de novos componentes no sistema

como linhas de transmissão ou um capacitor shunt são uma questão delicada, pois o local de instalação destes pode contribuir para modificar de forma crucial o sentido do fluxo de potência do sistema, fator este que determina se a resposta do sistema será favorável ou não à ação aplicada.

As consequências da inserção destas medidas foram observadas neste trabalho partindo de sistemas pequenos, como o de três barras, e também em sistemas complexos, como o sistema de 57 e 118 barras. Nos sistemas maiores o resultado das técnicas é minimizado dada a sua robustez, portanto, conclui-se que a perspectiva dos operadores do sistema deve ser extensa, de maneira a considerar vários cenários e fatores antes de decidir qual técnica isolada ou conjunta será tomada para aumentar a margem de carga do seu sistema.

6. TRABALHOS FUTUROS

A seguir são apresentadas algumas sugestões baseadas neste trabalho para serem utilizadas em trabalhos futuros:

- Aplicar as ações de controle testadas neste trabalho em sistemas reais como por exemplo o sistema sul-sudeste.
- Considerar na metodologia proposta a instalação dos elementos da ação de controle (capacitor shunt e linhas de transmissão) em pontos diferentes dos quais foram utilizados neste trabalho.

7. REFERÊNCIAS

- ABRANTES, Adriano Lima. **Análise Estática de Estabilidade de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência via Nomogramas e Computação Paralela**. 2013. 58 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013. Disponível em: <<http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180500/tce-14012014-094750>>. Acesso em: 15 jun. 2016.
- BARBOSA, Maciel F. **Estabilidade de Sistemas Elétricos de Energia**. Notas de Aula. Porto, Portugal, 2013. Disponível em: <<http://paginas.fe.up.pt/~fmb/Textos/EstabilidadeSEE2013.pdf>>. Acesso em: 18 jun. 2016.
- BEDOYA, Duvier Ronaldo. **Obtenção da Margem Mínima de Estabilidade de Tensão de Sistemas Elétricos de Potência**. 2007. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000415884>>. Acesso em: 18 jun. 2016.
- BORGES, Carmem. **Análise de Fluxo de Potência em Regime Permanente em Sistemas Elétricos de Potência**. Cese Transmissão – Análise de Sistemas Elétricos. Universidade Federal de Itajubá. Disponível em: <http://www.dee.ufrj.br/lasp/disciplinas/Apostila_Completa_ANALISE_DE_SISTEMAS_DE_POTENCIA.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2016.
- BORGES Junior, MEDEIROS, Bruna Trojan. **Aplicação de Fluxo de Potência no Nível de Subestação à Sistemas de Potências Reais**. 2009. 84 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009. Disponível em: <<http://www.cricte2004.eletrica.ufpr.br/ufpr2/tccs/25.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2016.
- BROLIN, Leandro Castilho. **Análise de Planos de Corte de Carga Através de Métodos Diretos**. 2010. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18154/tde-08022011095057/pt-br.php>>. Acesso em: 20 jun. 2016.
- CANOSSA, Jáine Henrique. **"Um Programa Interativo para Estudos de Fluxo de Potência"**. 2007. 169 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2007. Disponível em: <http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/pos-graduacao/202-dissertacao_jaine_henrique_canossa.pdf>. Acesso em: 29 jun. 2016.
- CARVALHO, Roberto Cunha de. **Uma Metodologia para Análise Expedita da Máxima Injeção de Potência Ativa por Gerador Distribuído**. 2015. 196 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <http://www.coep.ufrj.br/~tarang/COE888/Tese_Roberto.pdf>. Acesso em: 02 jul. 2016.

ELGERD, O. – **Energy System Theory: Na Introduction**. McGraw-Hill, 1971.
Disponível em: <<https://docs.google.com/file/d/0B5vXY4-Kg5GebFIFT3hwZVNCY0k/edit>>.
Acesso em: 03 jul. 2016.

GRAINGER, John Júnior; STEVENSON Júnior, WILLIAN – **Power System Analysis**. McGraw-Hill, 1994.
Disponível em:
<http://www.eeh.ee.ethz.ch/fileadmin/user_upload/eeh/studies/courses/modelling_and_analysis_of_power_networks/Documents/PSA_skript12.pdf>. Acesso em: 03 jul. 2016.

HODGKIRSON, P, G. “**Use of Embedded Generators for voltage support in rural distribution networks**”, UPEC 202, Universities Power Engineering Conference, 2000.
Disponível em:
<https://www.academia.edu/2839625/Reduction_of_voltage_violations_from_embedded_generators_connected_to_the_distribution_network_by_intelligent_reactive_power_control>.
Acesso em: 05 jul. 2016.

IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, “**Definition and Classification of Power System Stability**”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 3, Aug. 2004.

KUNDUR, P. **Power system stability and control**. Palo Alto: MCGraw-Hill, 1994.
Disponível em:
<<https://docs.google.com/file/d/0ByS7mm27UFt9Q1pHazdpRE1aaEU/view>>. Acesso em: 22 set. 2016.

LAMBERT, J. A. G. “**Acurate voltage phasor measurement in aseries-compensated network.**” IEEE Trans. Power Delivery, vol 9, n. 1, pp. 501-509, Jan. 1994.

LOPES, Thales Terrola e. **Estimadores de Estado em Sistemas de Energia Elétrica Incluindo Restrições Fuzzy**. 2008. 298 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Programa de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.
Disponível em: <<http://www.pee.ufrj.br/teses/textocompleto/2008063002.pdf>>. Acesso em: 22 set. 2016.

MALANGE, Francisco Carlos Vieira. “**Proposta de Parametrização para o Fluxo de Carga Continuado Visando Redução de Perdas na Transmissão e o Aumento da Margem Estática de Estabilidade de Tensão**”. 2008. 140 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2008.
Disponível em:
<http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/100316/malange_fcv_dr_ilha.pdf?sequence=1>. Acesso em: 22 set. 2016.

MATOS, Roger Guedes. “**Processamento de Erros Grosseiros na Estimação de Estado de Sistemas de Potência em Condições Críticas de Redundância**”. 2000. 147 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2000.
Disponível em: <<http://www.eletrica.ufpr.br/uff2/professor/8/Rog-MATOS%20Processamento%20de%20Erros-1983.pdf>>. Acesso em: 22 set. 2016.

MESQUITA FILHO, Júlio de. **Proposição de uma Técnica de Parametrização Geométrica para o Fluxo de Carga Continuado Baseado nas Variáveis Tensão e Fator de Carregamento.** 2006. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira - Sp, 2007.
Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-17592008000300010>. Acesso em: 22 set. 2016.

MIKILITA, Miguel Armindo Saldanha. **Um Modelo de Fluxo de Potência Ótimo para Minimização do Corte de Carga.** 2005. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.
Disponível em:
<http://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/2874/Disserta%C3%A7%C3%A3o_Miguel_Mikilita.pdf?sequence=1>. Acesso em: 19 set. 2016.

MONTICELLI, Alcir José. **Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica.** São Paulo: Blücher Ltda, 1983. 87 p.
Disponível em: <<http://www.eletrica.ufpr.br/ufpr2/professor/8/Liv-Monticelli%20Fluxo%20De%20Carga-1983.pdf>>. Acesso em: 19 set. 2016.

MOTA JUNIOR, Waldir de Melo. **Utilização de Pseudomedidas em Benefício da Estimção de Estado em Sistemas de Potência.** 2010. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2010.
Disponível em: <<http://www.pee.ufrj.br/teses/textocompleto/2008063002.pdf>>. Acesso em: 19 set. 2016.

OHI, Daniel Kenji de Alencar. **Análise e estudo de Estabilidade em Sistemas Elétricos de Potência.** 2011. 110 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.
Disponível em:
<<http://www.dee.ufc.br/anexos/TCCs/2011.1/DANIEL%20KENJI%20DE%20ALENCAR%20OHI.pdf>>. Acesso em: 19 set. 2016.

ONS. **Atuação do ONS sobre o Sistema Interligado Nacional.** 2016. Disponível em:
<<http://www.ons.org.br/atuacao/index.aspx>>. Acesso em: 05 out. 2016.

PAIVA, Isabella de Freitas Borges. **Comportamento da Curva QV nas Barras da Região Crítica de um Sistema Elétrico.** 2007. 133 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.
Disponível em: <<http://saturno.unifei.edu.br/bim/0032067.pdf>>. Acesso em: 19 set. 2016.

RESENDE, Jaqueline Lindolores. **Método do Ponto de Colapso Aplicado na Análise de Contingências Críticas em Sistemas Elétricos de Potência.** 2007. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2007.
Disponível em: <<http://www.ufjf.br/ppee/files/2008/12/211058.pdf>>. Acesso em: 19 set. 2016.

SANTOS, Luís Fabiano dos. **Avaliação de Algoritmos numéricos de Proteção para Linhas com Compensação Série**. 2006. 267 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2006.

Disponível em: <<http://saturno.unifei.edu.br/bim/0030641.pdf>>. Acesso em: 19 set. 2016.

SANTOS, Tiago Manuel Ferreira dos. **Configuração em malha vs. configuração radial**. 2013. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Técnico Lisboa, Lisboa, 2013.

Disponível em:

<<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395146020496/dissertacao.pdf>>. Acesso em: 19 set. 2016.

STAGG, G. W. **Computação Aplicada a Sistema de Geração e Transmissão de Potência**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois S. A, 1979.

Disponível em: <http://bibcentral.ufpa.br/arquivos/150000/152500/19_152574.htm>. Acesso em: 19 set. 2016.

SILVEIRA, Cristiano da Silva. **Estudo de Máximo Carregamento em Sistemas de Energia Elétrica**. 2003. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18133/tde-08032007-113530/pt-br.php>>. Acesso em: 19 set. 2016.

STEVESON Jr., William D. GRAINGER, John J. **Power System Analysis**. Estados Unidos: MCGraw-Hill, Inc, 1994.

STOTT, B; Alsac, o. **Fast decoupled load flow**, IEEE Transactions on Power Systems, v. PAS-93, n. 3, p. 859-869, 1974.

THOMAS, Bruno Tumarin, “**Voltage Stability Criteria, Undervoltage Load Shedding Strategy and Reactive Power Reserve Monitoring Methology**”, Western Systems Coordinating Council, May 1998.

Disponível em:

<<https://www.wecc.biz/Reliability/Voltage%20Stability%20Criteria%20May%201998.pdf>>. Acesso em: 20 set. 2016.

VALE, Mauro Henrique. “**Notas de Aula da Disciplina Supervisão e Controle**”, Curso do Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica (LRC/PPGE), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

Disponível em: <<http://www.ufmg.br/ppee/files/2012/11/2596058.pdf>>. Acesso em: 20 set. 2016.

VAN NESS, J. E. **Iteration methods for digital load flow studies**. Transactions AIEEE (Power Apparatus and Systems), v. 78^a, pt. III, p. 919-924, 1959.

Disponível em:

<https://www.researchgate.net/publication/3484934_Iteration_Methods_for_Digital_Load_Flow_Studies>. Acesso em: 20 set. 2016.

WSCC, Final Report, Voltage Stability Criteria, **Undervoltage Load Shedding Strategy, and Reactive Power Reserve Monitoring Methodology**, Reactive Power Reserve Work Group (RRWG), 1998, 154p.

Disponível em:

<<https://www.wecc.biz/Reliability/Voltage%20Stability%20Criteria%20May%201998.pdf>>.

Acesso em: 20 set. 2016.