

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CÂMPUS DE CURITIBA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ERICA YUKO MIYOSHI KOONO
RICARDO DOS SANTOS SANTANA

**ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TENSÃO E MÁXIMA
TRANSFERÊNCIA DE POTÊNCIA: UTILIZAÇÃO DO MÉTODO
“LOOK AHEAD” MODIFICADO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2017

ERICA YUKO MIYOSHI KOONO
RICARDO DOS SANTOS SANTANA

**ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TENSÃO E MÁXIMA
TRANSFERÊNCIA DE POTÊNCIA: UTILIZAÇÃO DO MÉTODO
“LOOK AHEAD” MODIFICADO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina TCC 2, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Raphael Augusto de Souza Benedito

CURITIBA
2017

Erica Yuko Miyoshi Koono
Ricardo Dos Santos Santana

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TENSÃO E MÁXIMA TRANSFERÊNCIA DE POTÊNCIA: UTILIZAÇÃO DO MÉTODO “LOOK AHEAD” MODIFICADO

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 14 de junho de 2017.

Prof. Emerson Rigoni, Dr.
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica

Profa. Annemarlen Gehrke Castagna, Mestre
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

Raphael Augusto de Souza Benedito, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Andrea Lucia da Costa, Dra.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Paulo Cícero Fritzen Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Raphael Augusto de Souza Benedito Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaríamos de agradecer ao Prof. Dr. Raphael Augusto de Souza Benedito, não somente pela orientação deste trabalho, como também pela sua dedicação, paciência e ensinamentos ao longo de todo o processo.

Também não poderíamos deixar de agradecer aos nossos amigos, Lucas Eduardo Ribeiro e Ketlyn Rodrigues de Oliveira, por terem nos ajudado ao longo do desenvolvimento deste trabalho, nos auxiliando através de seus conhecimentos e experiências.

Por fim, agradecemos também aos nossos pais, irmãos e aos demais amigos que não foram citados, pelo carinho e pelo apoio nas horas mais difíceis, fazendo com que os nossos dias se tornassem mais agradáveis, nos dando força para continuar.

RESUMO

KOONO, Erica Y.M.; SANTANA, Ricardo S. **Análise de estabilidade de tensão e máxima transferência de potência: utilização do método “look ahead” modificado.** 2016. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

Este trabalho apresenta um estudo e implementação computacional do método denominado “look ahead” modificado, para a estimativa do ponto de máximo carregamento de sistemas elétricos de potência. Tal método permite efetuar uma análise rápida da estabilidade de tensão a partir da estimativa da curva “PxV” (ou “ λxV ”) através de apenas três soluções de fluxo de potência. Neste contexto, também foi estudado e implementado um algoritmo de Fluxo de Potência Continuado (FPC) que serviu como base para o método “look ahead” e para comparar os resultados obtidos. Nas simulações computacionais, foram utilizados os sistemas-testes de 5 barras (Stagg e El-Abiad) e o de 14 barras do IEEE. Através dos resultados, verifica-se que o método “look ahead” modificado demonstra-se muito eficiente para a estimativa rápida do ponto crítico de um sistema. Quanto maior for o tamanho do passo inicial, maior a precisão do método, portanto, é melhor utilizar pontos próximos ao ponto de máximo carregamento.

Palavras chave: Fluxo de potência continuado. Ponto de máximo carregamento. *Look ahead* modificado. Estabilidade de tensão.

ABSTRACT

KOONO, Erica Y. M.; SANTANA, Ricardo S. **Voltage Stability Analysis: computational implementation of the modified “look ahead”**. 2016. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

This paper presents a study and a computational implementation of the method called modified “look ahead”, for the estimation of the point of maximum load of electrical power systems. This method provides a quick analysis of the voltage stability through the estimation of the “P_xV” (or “λ_xV”) curve, using only three power-flow solutions. In this context, it was also studied and implemented a Continuous Power-Flow algorithm, which was used as the basis for the modified “look ahead” method and to compare the results. For the computational simulations, 5-bar (Stagg e El-Abiad) test systems and 14-bar of IEEE test systems were used. Through the results, the modified “look ahead” method proves to be very efficient for the rapid estimation of the critical point. It is also verified that the larger the initial step size, the greater the accuracy of the method.

Keywords: Continuation power flow. Maximum load point. Modified look ahead. Power System Stability.

LISTA DE SIGLAS, ACRÔNIMOS E ABREVIATURAS

CIGRE	Council on Large Electric Systems
FPC	Fluxo de potência continuado
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
PMC	Ponto de máximo carregamento
SEP	Sistema elétrico de potência
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exemplo de Curva PxV	13
Figura 2: Modelo de linha π equivalente Fonte: Fogaça; Justi; Mazza, 2014.	20
Figura 3: Método do FPC utilizando a carga como parâmetro de continuação	21
Figura 4: Determinação do máximo carregamento do sistema através do ajuste da Curva ($\lambda - V$)	23
Figura 5: Determinação do máximo carregamento do sistema através do ajuste da Curva $\lambda \times V$ considerando 3 fluxos de potência.....	28
Figura 6: Fluxograma do algoritmo do FPC.....	30
Figura 7: Fluxograma do algoritmo do "look ahead modificado"	32
Figura 8: Sistema de 5 barras	34
Figura 9: FPC das barras de carga – Sistema de 5 barras	36
Figura 10: Curva $\lambda \times V$, para $\Delta\lambda=0,4$	37
Figura 11: Curva $\lambda \times V$, para $\Delta\lambda=1,0$	39
Figura 12: Curva $\lambda \times V$, para $\Delta\lambda=1,5$	40
Figura 13: Curva $\lambda \times V$, para $\Delta\lambda=3,0$	41
Figura 14: Sistema de 14 barras do IEEE	43
Figura 15: FPC das barras de cargas – Sistema de 14 barras.....	46
Figura 16: Curva $\lambda \times V$, para $\Delta\lambda=0,4$	47
Figura 17: Curva $\lambda \times V$, para $\Delta\lambda=1,0$	48
Figura 18: Curva $\lambda \times V$, para $\Delta\lambda=1,5$	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados de barras para o sistema de 5 barras	35
Tabela 2: Fatores de participação de geração e de carga	35
Tabela 3: Dados de linha do sistema de 5 barras	35
Tabela 4: Resultados parciais do look ahead modificado para a barra 3 quando $\Delta\lambda=0,4$	37
Tabela 5: Dados obtidos quando $\Delta\lambda=0,4$	38
Tabela 6 Resultados parciais do look ahead modificado para a barra 3 quando $\Delta\lambda=1,0$	38
Tabela 7: Dados obtidos quando $\Delta\lambda=1,0$	39
Tabela 8: Resultados parciais do look ahead modificado para a barra 3 quando $\Delta\lambda=1,5$	40
Tabela 9: Dados obtidos quando $\Delta\lambda=1,5$	40
Tabela 10: Resultados parciais do look ahead modificado para a barra 3 quando $\Delta\lambda=3,0$	41
Tabela 11: Dados obtidos quando $\Delta\lambda=3,0$	41
Tabela 12: Dados de barra do sistema de 14 barras	44
Tabela 13: Fatores de participação de geração e de carga	45
Tabela 14: Dados de linha do sistema de 14 barras	45
Tabela 15: Dados obtidos quando $\Delta\lambda=0,4$	47
Tabela 16: Resultados parciais do look ahead modificado para a barra 14 quando $\Delta\lambda=0,4$	47
Tabela 17: Dados obtidos quando $\Delta\lambda=1,0$	48
Tabela 18: Resultados parciais do look ahead modificado para a barra 14 quando $\Delta\lambda=1,0$	49
Tabela 19: Dados obtidos quando $\Delta\lambda=1,5$	50
Tabela 20: Resultados parciais do look ahead modificado para a barra 14 quando $\Delta\lambda=1,5$	50

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	TEMA	11
1.1.1	Delimitação do Tema	12
1.2	PROBLEMA E PREMISSAS	12
1.3	OBJETIVOS	14
1.3.1	Objetivo Geral	14
1.3.2	Objetivos Específicos	14
1.4	JUSTIFICATIVA	14
1.5	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	15
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	INTRODUÇÃO	17
2.2	FLUXO DE POTÊNCIA CONTINUADO	17
2.3	LOOK AHEAD	22
2.4	LOOK AHEAD MODIFICADO	27
3	DESENVOLVIMENTO DOS ALGORITMOS	29
3.1	INTRODUÇÃO	29
3.2	ALGORITMO DESENVOLVIDO DO FLUXO DE POTÊNCIA CONTINUADO	29
3.3	ALGORITMO DESENVOLVIDO DO LOOK AHEAD MODIFICADO	31
4	RESULTADOS	34
4.1	INTRODUÇÃO	34
4.2	SISTEMA DE 5 BARRAS	34
4.3	SISTEMA DE 14 BARRAS	43
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	52
	REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

1.1 TEMA

A estabilidade de tensão refere-se à capacidade do sistema elétrico de potência em manter a tensão estável em todas as barras após a ocorrência de perturbações a partir de uma dada condição inicial de operação (VAN CUTSEM; VOURNAS, 1998). Kundur et al. (2004) ressalta que depende, juntamente, da capacidade de manter/restaurar o equilíbrio entre a carga demandada e a potência gerada do Sistema Elétrico de Potência (SEP).

Para Kundur et al. (2004), um possível resultado de instabilidade de tensão é a perda de carregamento em uma área, ou perturbações nas linhas de transmissão e outros elementos por seu sistema de proteção causando interrupções em cascata.

Martins (2011) diz que quando o sistema está em funcionamento normal podem ocorrer grandes aumentos de carga, mudanças em sua configuração, perdas de linhas de transmissão ou outra contingência grave que cause um afundamento progressivo e sem controle na tensão de seus barramentos. Este efeito é baseado na incapacidade de resposta do SEP às solicitações de potência reativa. Se a tensão nesse barramento começar a decair com o aumento da injeção de reativos, diz-se que o sistema é instável. Desta forma observa-se que este fenômeno é local, porém suas consequências podem ser sentidas por todo o SEP.

De acordo com Van Cutsem e Vournas (1998), Carson-Taylor (1994) e Kundur et al. (2004) o termo colapso de tensão também é utilizado frequentemente. Este processo é acompanhado por uma sequência de eventos de instabilidade de tensão levando a blecautes ou significantes anomalias em parte do SEP ou até mesmo no sistema como um todo.

O colapso de tensão é um dos maiores desafios que os sistemas elétricos de potência enfrentam atualmente, principalmente em sistemas com muitas interligações. Segundo Van Cutsem e Vournas (1998), o problema consiste em conseguir transferir a máxima quantidade de potência através do sistema (geração, linhas de transmissão) mantendo a tensão estável.

Neste contexto, torna-se imprescindível que os operadores dos sistemas

elétricos disponham de ferramentas computacionais avançadas capazes de analisar e prever instabilidade na tensão. Além disso, tais ferramentas devem fornecer resultados rápidos, de modo que os operadores possam tomar ações preventivas e/ou corretivas antes do colapso do sistema.

Buscando esses objetivos, será feita a análise da estabilidade de tensão através do método “*look ahead*” desenvolvida por Chiang et al. (2003), e método “*look ahead* modificado” desenvolvida por Martins (2011).

Tal método consiste em estimar o ponto de máximo carregamento (PMC) do sistema através da execução de apenas dois ou três cálculos de fluxo de potência, tornando o método mais rápido, porém, não tão preciso.

1.1.1 Delimitação do Tema

Kundur et al. (2004) traz a definição clássica para o colapso de tensão como sendo uma diminuição lenta e gradual nas tensões das barras de um sistema de potência altamente carregado devido ao aumento da demanda. Com o contínuo aumento da demanda por potência, chega um momento em que a tensão em algumas barras do sistema diminui drasticamente causando a interrupção no fornecimento de energia em parte ou, dependendo da gravidade, em todo o sistema.

Além disso, a análise da estabilidade de tensão visa quantificar a distância do ponto de operação atual ao ponto de máximo carregamento, isto é, medir sua margem de estabilidade.

O ponto principal deste trabalho de conclusão de curso é explicar o funcionamento do colapso e estudar um método para a determinação do PMC do sistema elétrico de potência.

Para isso, será utilizado como referência a técnica que traz o requisito da velocidade, denominada “*look ahead*”, desenvolvida por Chiang et al. (1997) e que explora a característica quadrática que a curva P_xV apresenta próximo ao PMC.

1.2 PROBLEMA E PREMISSAS

A busca por métodos cada vez mais rápidos e/ou precisos para o cálculo e estimativa da margem de estabilidade tem se tornado cada vez mais comum e recorrente, visto que o problema do colapso de tensão pode ser considerado um dos

mais severos, do ponto de vista de operação dos SEPs.

O problema a ser estudado parte do princípio de que a adição lenta e gradual de cargas ao sistema pode levar à instabilidade, e nos casos mais graves, ao colapso de tensão do sistema. Uma das formas de se estudar o fenômeno de instabilidade de tensão é através do levantamento da curva PxV, que consiste na solução de sucessivos fluxos de potência considerando o aumento gradual do carregamento a cada nova solução. Essa curva associa o valor da tensão no barramento à sua respectiva carga ou à carga total do sistema, facilitando a análise da margem de estabilidade.

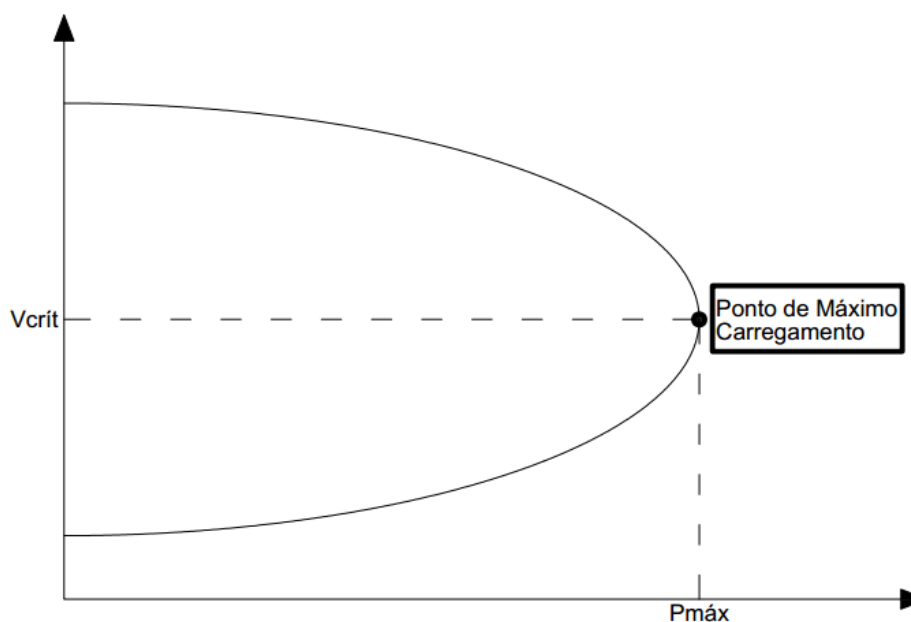


Figura 1: Exemplo de Curva PxV

A figura 1 mostra uma curva PxV típica, onde pode-se observar a variação da tensão (V) conforme o aumento da carga (P). O ponto de bifurcação da curva representa seu limite entre as partes estável e instável, determinando o ponto de máximo carregamento do sistema.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver um algoritmo no Matlab para o cálculo rápido do ponto de colapso de tensão.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Estudar os métodos aplicados na análise de colapso de tensão.
- Estudar o método “*look ahead*”.
- Estudar o método “*look ahead* modificado”.
- Implementar o algoritmo para cálculo rápido baseado no método “*look ahead* modificado”.
- Analisar estudos de caso considerando o sistema de 5 (cinco) barras (Stagg e El-Abiad, 1968) e o sistema de 14 barras do IEEE.

1.4 JUSTIFICATIVA

Conforme comentado anteriormente, o problema de estabilidade de tensão é um dos maiores desafios que os sistemas elétricos de potência atuais enfrentam. Por isso a busca por ferramentas de análise de estabilidade tem ganhado importância, não só no Brasil, mas em vários países que também enfrentam este problema.

O aumento da demanda energética, combinados a fatores ambientais – dificultando a construção de mais usinas geradoras – e econômicos (falta de investimento no setor energético), têm tornado o sistema cada vez mais estressado, instável e susceptível a falhas.

Nos últimos anos, diversos blecautes têm sido associados ao colapso de tensão, pode-se tomar como exemplo os ocorridos em (RICHA; KUMAR; DHIRAJ, 2012):

- 2 de maio de 1995, ocorrência de distúrbios nos sistemas de potência do Sri

Lanka;

- Dezembro de 1996, ocorrência de distúrbios na região norte da rede de energia da Índia;
- Agosto de 2003, que afetou parte do Canadá e dos Estados Unidos (U.S. – Canada Task Force, 2004);
- 24 de setembro de 2006, ocorrência de distúrbios no sistema da rede nacional do Paquistão;

Além dos casos acima, pode-se citar também o caso ocorrido no Brasil, em 2009, causada também pelo fenômeno do colapso de tensão, o distúrbio afetou os estados de São Paulo, Rio de Janeiro, Espírito Santo e Mato Grosso do Sul (ONS, 2009).

Tendo em vista este cenário, a busca por métodos cada vez mais rápidos, que auxiliem na avaliação *on-line* do sistema, torna-se necessária para que esses colapsos de tensão não voltem a ocorrer.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Primeiramente será desenvolvida uma revisão bibliográfica a fim de embasar o conhecimento teórico sobre o tema de estabilidade de tensão e métodos de cálculo para a obtenção do ponto crítico da curva PxV .

Em seguida, será dado enfoque ao estudo dos métodos “*look ahead*” e “*look ahead* modificado”. Após concluídos os estudos, começará o desenvolvimento do algoritmo que estima, de modo rápido, o ponto de colapso de tensão, baseado no método “*look ahead* modificado”. O *software* a ser utilizado para a programação e compilação será o Matlab, que possui uma linguagem de alto-nível.

Para a verificação do funcionamento e implementação do algoritmo, serão utilizados sistemas já conhecidos no meio acadêmico, cujos resultados são previamente conhecidos.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para a apresentação deste trabalho, propõe-se a seguinte estrutura:

Capítulo 1 – Apresentação do trabalho, definição e delimitação do tema a

ser abordado e objetivos.

Capítulo 2 – Revisão bibliográfica e fundamentação teórica sobre o tema, dando ênfase ao método “*look ahead* modificado”.

Capítulo 3 – Detalha a estrutura e desenvolvimento do algoritmo elaborado.

Capítulo 4 – Apresenta os resultados da aplicação do algoritmo do método “*look ahead* modificado”, utilizando sistemas já existentes para a comparação dos resultados.

Capítulo 5 – Conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTRODUÇÃO

Conforme apresentado no capítulo anterior, a estabilidade de tensão pode ser definida como a capacidade do sistema em manter seus perfis adequados de tensão, em operação normal ou até mesmo após contingências.

Para facilitar o estudo do fenômeno de instabilidade de tensão, é recomendável fazer o levantamento das curvas PxV do sistema. Os métodos mais comumente utilizados para a obtenção dessa curva serão estudados e apresentados neste capítulo, com o objetivo de compreender a melhor maneira de desenvolver o algoritmo final, que é o objetivo deste trabalho.

2.2 FLUXO DE POTÊNCIA CONTINUADO

O método mais comumente utilizado de análise estática de estabilidade de tensão é o fluxo de potência continuado (FPC). Seu objetivo é encontrar o ponto de bifurcação da curva PxV através da realização de sucessivos fluxos de potência convencionais, utilizando o método de Newton-Raphson, considerando um aumento gradual da carga ou um decréscimo gradual da tensão (MARTINS, 2011).

No cálculo do fluxo de potência, a modelagem do sistema é estática, ou seja, é representada por conjuntos de equações e inequações algébricas não-lineares. Essa modelagem é aceitável pois considera uma variação de tempo suficientemente lenta para desprezar-se os efeitos transitórios (MONTICELLI, 1983).

Para a formulação básica do problema, são associadas quatro variáveis a cada barra da rede, sendo duas tratadas como dados, e duas tratadas como incógnitas:

V_k – magnitude da tensão nodal (barra k);

θ_k – ângulo da tensão nodal;

P_k – geração líquida de potência ativa;

Q_k – geração líquida de potência reativa.

Dessa maneira, pode-se classificar a barra em três tipos, dependendo de quais variáveis são consideradas incógnitas ou dados.

A primeira barra é a barra PQ, onde são fornecidos P_k e Q_k , e calcula-se V_k e θ_k . As barras PQ representam as barras de carga.

Já para as barras PV, P_k e V_k são dados, enquanto Q_k e θ_k são as incógnitas. Estas barras representam as barras de geração.

Por fim, existem também as barras de referência, que também podem ser chamadas de $V\theta$. Para estas barras são fornecidos V_k e θ_k , e calcula-se P_k e Q_k . As barras de referência possuem duas funções: fornecer a referência angular do sistema e fechar o balanço de potência (MONTICELLI, 1983, p.2).

No equacionamento do fluxo de potência, são utilizadas duas equações para cada barra, que baseiam-se nas Leis de Kirchhoff.

A Primeira a Lei de Kirchhoff impõe a conservação das potências ativa e reativa em cada nó da rede, ou seja, a injeção de potência em uma barra deve ser igual à soma dos fluxos de potência que deixam a mesma. A Segunda Lei de Kirchhoff expressa os fluxos de potência como funções das tensões dos seus nós terminais (MONTICELLI, 1983).

$$P_k = \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \quad (2.1)$$

$$Q_k + Q_k^{sh}(V_k) = \sum_{m \in \Omega_k} Q_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \quad (2.2)$$

Onde:

k – número de barras da rede;

Ω_k – conjunto das barras vizinhas da barra k ;

V_k, V_m – magnitudes das tensões das barras terminais do ramo $k - m$;

θ_k, θ_m – ângulos das tensões das barras terminais do ramo $k - m$;

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

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

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

Partindo dessas equações básicas, utiliza-se métodos iterativos para a resolução do sistema. Neste caso, será utilizado o método de Newton-Raphson.

Considerando um sistema n-dimensional:

$$g(x) = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P^{esp} - P(V, \theta) \\ Q^{esp} - Q(V, \theta) \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Onde pretende-se encontrar o valor do vetor x , para o qual a função vetorial $g(x)$ se anula:

$$g(x) = 0 \quad (2.4)$$

Para isso, são necessários alguns passos, determinados pelo seguinte algoritmo (FOGAÇA; JUSTI; MAZZA, 2014, p. 31):

1. Iniciar o contador de iterações ($v = 0$), e escolher uma solução inicial $x = x^{(v)} = x^{(0)}$.
2. Calcular $g(x^{(v)})$.
3. Testar a convergência. Se $|g(x^{(v)})| \leq \varepsilon$ (onde ε representa uma tolerância previamente estabelecida), o processo convergiu, caso contrário, seguir para o passo 4.
4. Calcular a matriz Jacobiana $J = g(x)$.
5. Determinar uma nova solução $x^{(v+1)}$

$$\Delta x^v = -J[x^v]^{-1} g(x^{(v)}) \quad (2.5)$$

$$x^{v+1} = x^v + \Delta x^v \quad (2.6)$$

6. Fazer $v = v + 1$ e voltar para o passo 2.

As incógnitas serão os estados (V_k, θ_k) de todas as barras da rede, representadas pelo vetor x .

$$x = \begin{bmatrix} \theta \\ V \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Enquanto a matriz Jacobiana é dada por:

$$J(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial(\Delta P)}{\partial \theta} & \frac{\partial(\Delta P)}{\partial V} \\ \frac{\partial(\Delta Q)}{\partial \theta} & \frac{\partial(\Delta Q)}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

A partir dos valores de θ e V obtidos através do método numérico, deve-se

substituir os mesmos nas equações de injeção de potência ativa (2.1) e reativa (2.2), sendo que:

$$P_{km} = V_k^2 g_{km} - V_k V_m g_{km} \cos \theta_{km} - V_k V_m b_{km} \sin \theta_{km} \quad (2.9)$$

$$Q_{km} = -V_k^2 (b_{km} + b_{km}^{sh}) + V_k V_m b_{km} \cos \theta_{km} - V_k V_m g_{km} \sin \theta_{km} \quad (2.10)$$

Onde

g_{km} é a condutância série da linha, sendo $g_{km} = \frac{r_{km}}{r_{km}^2 + X_{km}^2}$;

b_{km} é a susceptância série da linha, sendo $b_{km} = -\frac{X_{km}}{r_{km}^2 + X_{km}^2}$;

b_{km}^{sh} é a susceptância *shunt* (ou em derivação) da linha.

A Figura 2 ilustra o modelo de linha utilizado para o equacionamento dos fluxos de potência ativa e reativa.

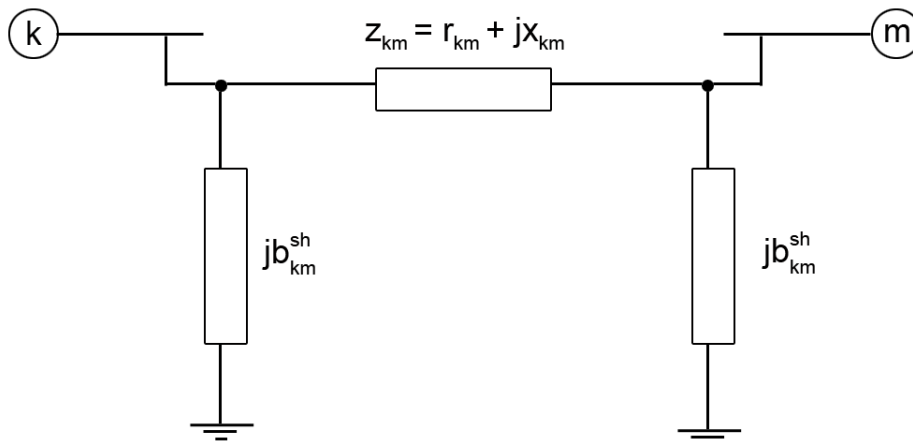


Figura 2: Modelo de linha π equivalente
Fonte: Fogaça; Justí; Mazza, 2014.

Assim encontra-se os valores da potência ativa da barra de referência e as potências reativas das barras PV e referência (FOGAÇA; JUSTI; MAZZA, 2014, p. 32).

No FPC considerando a carga como parâmetro de continuação, utiliza-se o método do cálculo de fluxo de potência convencional diversas vezes, sendo que a cada nova resolução, acrescenta-se um parâmetro previamente estabelecido à carga. Esse parâmetro de continuação μ representa um aumento gradual do carregamento, podendo corresponder a um ΔP , ΔQ ou um $\Delta \lambda$. Sendo que λ representa também a carga, porém já parametrizada. Assim, cada resolução do fluxo de potência

convencional corresponde a um ponto da curva P \times V.

No PMC, a resolução do fluxo de potência convencional – considerando a carga como parâmetro de continuação – não irá convergir, visto que a matriz Jacobiana utilizada na solução do sistema não linear será singular. Entretanto, ao diminuir o valor do passo utilizado no FPC, é possível aproximar-se consideravelmente do ponto de bifurcação real, tornando-o convergente para fins de cálculo e previsão do ponto de colapso de tensão (BENEDITO; JUSTI, 2016).

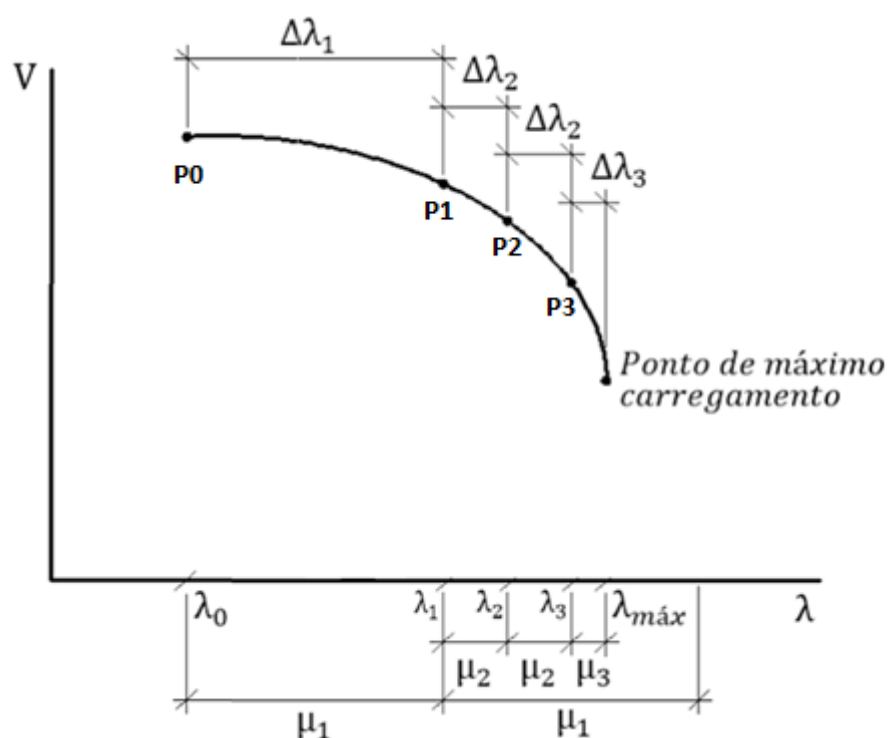


Figura 3: Método do FPC utilizando a carga como parâmetro de continuação
 Fonte: Garcia; Pereira; Perreto, 2014.

A Figura 3 ilustra o funcionamento do método do FPC. Pode-se observar que primeiramente foi executado o fluxo de potência convencional para uma situação inicial, obtendo-se o ponto P_0 . Em seguida, foi utilizado μ_1 como incremento de carga para um novo cálculo de fluxo de potência e obteve-se o ponto P_1 . Utilizando esse mesmo incremento de carga μ_1 , o fluxo de potência não converge, ultrapassando o PMC. Neste caso, reduz-se o valor do incremento de carga para μ_2 , executa-se um novo cálculo do fluxo de potência e encontra-se o ponto P_2 . Novamente, acrescenta-se à carga μ_2 para realizar um novo fluxo de potência e encontra-se o ponto P_3 . Para esse ponto, acrescenta-se μ_3 à carga, pois μ_2 ultrapassaria o valor do PMC, fazendo com que o fluxo de potência não convirja. Dessa maneira, é possível encontrar um

ponto bem próximo ao real valor do PMC.

O fluxo de potência continuado considerando a carga como parâmetro de continuação permite determinar apenas a parte superior da curva PxV, que representa sua parte estável. Para encontrar os pontos inferiores, é necessário utilizar o FPC considerando uma das tensões eficazes como parâmetro de continuação (BENEDITO; JUSTI, 2016).

O FPC considerando a carga e uma das tensões eficazes como parâmetro de continuação também é conhecido como método de parametrização local, e baseia-se num método iterativo composto de uma previsão e uma correção para cada situação. Entretanto, por não se tratar do foco de estudo deste trabalho, não será abordado com maior profundidade.

2.3 LOOK AHEAD

O método de “*look ahead*” calcula o ponto de bifurcação da curva PxV a fim de verificar a capacidade do sistema de potência de suportar variações de cargas e possíveis contingências (CHIANG *et al.*, 1997).

A característica principal do “*look ahead*” é estimar o PMC da curva PxV com poucas soluções de fluxo de potência. O método consiste em analisar duas soluções de fluxo de potência, escolhendo dentre elas a que mais se aproxima do ponto de bifurcação da curva, depois de definido este ponto, aplica-se o vetor tangente a ele estimando o PMC. Sua simplicidade o torna um método de rápida execução, tornando-o adequado para avaliação online da margem de carregamento no problema de análise e seleção de contingências (MARTINS, 2011).

A sua formulação é baseada na solução do fluxo de potência. Consideram-se x_0 e x_1 as variáveis de estado (tensão ou ângulo) do sistema, para diferentes níveis de carregamento λ_0 e λ_1 conforme a Figura 4.

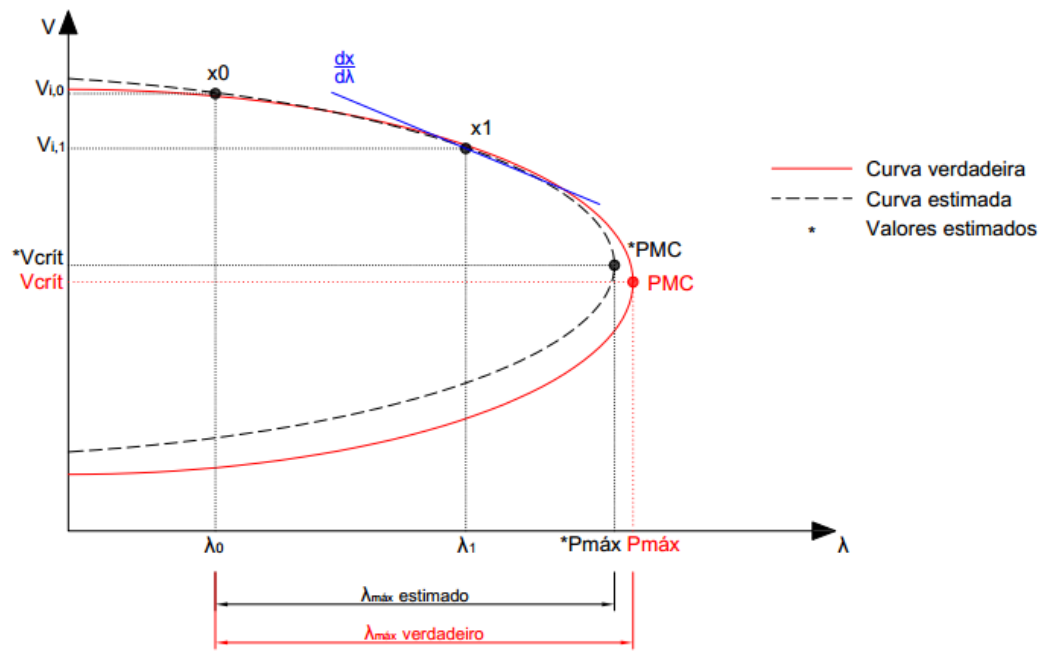


Figura 4: Determinação do máximo carregamento do sistema através do ajuste da Curva (λ - V)

Com esses dois pontos de operação (x_0 e x_1) estima-se o “PMC do sistema, representado pelo parâmetro $\lambda_{critico}$ ” (SANTOS, 2008).

A estimativa é realizada para a barra de carga mais sensível do sistema, chamada de barra piloto de tensão. Para determinar a barra piloto de tensão faz-se uso da expressão (2.11):

$$\Delta V_i = \frac{(V_{i\lambda_0} - V_{i\lambda_1})}{V_{i\lambda_0}} \quad (2.11)$$

Onde ΔV_i é a variação relativa de tensão da i -ésima barra de carga do sistema, $V_{i\lambda_0}$ é a tensão da i -ésima barra de carga correspondente ao ponto de operação x_0 da figura 3 e $V_{i\lambda_1}$ é a tensão da i -ésima barra de carga correspondente ao ponto de operação x_1 da figura 3. A barra de carga que possuir maior variação de tensão é escolhida como sendo a barra piloto de tensão. Nem sempre a mesma barra piloto apresenta maior variação de tensão e ângulo ao mesmo tempo. O sistema pode apresentar mais de uma barra piloto, uma referente à tensão (barra piloto de tensão) e outra referente ao ângulo (barra piloto de ângulo). A curva λ -V da barra piloto de tensão é escolhida para calcular a margem de carregamento do sistema. Utiliza-se a propriedade quadrática desta curva próximo ao ponto de bifurcação para estimar o

PMC. A estimativa é realizada ajustando-se uma curva quadrática λ - V , representada pela equação (2.12), (SANTOS, 2008).

$$\lambda = \alpha + \beta V_i + \gamma V_i^2 \quad (2.12)$$

Passando pelos pontos x_0 e x_1 , os parâmetros α, β e γ são incógnitas a determinar e V_i é a tensão da barra piloto de tensão do sistema. Os pontos de operação x_0 e x_1 na figura 3 são obtidos através do fluxo de potência. Conhecida as variáveis de estado x_0 e x_1 do sistema determinam-se as expressões (2.13) e (2.14).

$$\lambda_0 = \alpha + \beta V_{i,0} + \gamma V_{i,0}^2 \quad (2.13)$$

$$\lambda_1 = \alpha + \beta V_{i,1} + \gamma V_{i,1}^2 \quad (2.14)$$

Onde λ_0 e λ_1 representam o carregamento do sistema, sendo $\lambda_1 > \lambda_0$ e $V_{i,0}$ e $V_{i,1}$ são as tensões da barra piloto de tensão, referente a cada nível de carregamento, sendo $V_{i,1} < V_{i,0}$, conforme foi apresentado na Figura 4.

Percebe-se que as expressões (2.13) e (2.14) possuem três incógnitas (α, β e γ), então é necessário a obtenção de uma terceira expressão, chamada expressão auxiliar. Esta expressão auxiliar é obtida derivando-se (2.13) e (2.14) em relação ao parâmetro λ . Por conveniência será escolhida a expressão (2.14), devido esta representar o segundo ponto de operação (x_1). Este ponto de operação é escolhido pelo fato de estar mais próximo do ponto de bifurcação. Portanto, derivando-se a expressão (2.14) em relação a λ_1 , obtém-se a expressão auxiliar (2.15).

$$x_1 = 1 = \beta \frac{dV_i}{d\lambda_{\lambda_1}} + 2\lambda \frac{dV_i}{d\lambda_{\lambda_1}} \quad (2.15)$$

A expressão (2.15) possui um termo não conhecido $\frac{dV_i}{d\lambda_{\lambda_1}}$. Este termo é obtido através do cálculo do vetor tangente (SOUZA, 1996).

O vetor tangente indica o grau de sensibilidade das tensões e ângulos das barras do sistema, dada uma variação do parâmetro λ . Os elementos do vetor tangente fornecem informações importantes sobre a dinâmica do colapso de tensão, indicando quais são as barras mais atingidas pelo fenômeno (GUEDES, 2001).

Sejam as equações de fluxo de potência, com cargas variando de acordo com o parâmetro λ , dada por $G(x(\lambda), \lambda) = 0$. O vetor tangente $\frac{\Delta x}{\Delta \lambda} \approx \frac{dx}{d\lambda}$ pode ser calculado para um determinado ponto de equilíbrio (x, λ) . A Figura 2 ilustra o ponto de operação onde será calculado o vetor tangente. Este valor é calculado através da equação (2.16).

$$\begin{aligned}
 G(x, \lambda) &= 0 \\
 \frac{\partial G(x, \lambda)}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial G(x, \lambda)}{\partial \lambda} \Delta \lambda &= 0 \\
 \frac{\partial G(x, \lambda)}{\partial x} \Delta x &= - \frac{\partial G(x, \lambda)}{\partial \lambda} \Delta \lambda \\
 \frac{\partial G(x, \lambda)}{\partial x} \frac{\Delta x}{\Delta \lambda} &= - \frac{\partial G(x, \lambda)}{\partial \lambda}
 \end{aligned} \tag{2.16}$$

Onde a matriz dos coeficientes $\frac{\partial G}{\partial x}$ é a matriz jacobiana do fluxo de potência e $\frac{\partial G}{\partial \lambda}$ é o vetor das derivadas de equações de potência ativa e reativa.

A expressão (2.16) mostra que o vetor tangente pode ser calculado de maneira relativamente simples uma vez que a matriz jacobiana $\frac{\partial G}{\partial x}$ já foi calculada e fatorada durante a solução do fluxo de potência e o vetor $\frac{\partial G}{\partial \lambda}$ pode ser facilmente obtido. A dimensão da matriz jacobiana é $(NPV+2NPQ) \times (NPV+2NPQ)$, sendo NPV o número de barras PV e NPQ o número de barras PQ do sistema. O vetor $\frac{\partial G}{\partial \lambda}$ é calculado através da expressão (2.17).

$$\begin{aligned}
 G(x, \lambda) &= \begin{pmatrix} G_0(x, \lambda) \\ G_1(x, \lambda) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P^{esp}(\lambda) - P^{calc}(x) \\ Q^{esp}(\lambda) - Q^{calc}(x) \end{pmatrix} \\
 \frac{\partial G}{\partial \lambda} &= \begin{pmatrix} \frac{\partial G_0}{\partial \lambda} \\ \frac{\partial G_1}{\partial \lambda} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial P^{esp}(\lambda)}{\partial \lambda} \\ \frac{\partial Q^{esp}(\lambda)}{\partial \lambda} \end{pmatrix}
 \end{aligned} \tag{2.17}$$

Onde $P^{esp}(\lambda)$ e $Q^{esp}(\lambda)$, são respectivamente os vetores de potência ativa e reativa líquida, ou seja, potência ativa e reativa gerada menos a potência ativa e

reativa consumida pela carga do sistema.

O vetor $\frac{\partial G}{\partial \lambda}$ dado pela expressão (2.17), possui dimensão de (NPV+2NPQ). A matriz jacobiana $\frac{\partial G}{\partial x}$ e o vetor $\frac{\partial G}{\partial \lambda}$ são conhecidos. Para determinar o vetor tangente $\frac{dx}{d\lambda}$, deve-se resolver o sistema linear (2.16). Esse vetor possui dimensão de (NPV+2NPQ) e está representado pela expressão (2.18).

$$\frac{dx}{d\lambda} = \begin{bmatrix} \frac{d\theta_i}{d\lambda} \\ \vdots \\ \frac{dV_i}{d\lambda} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Portanto, é possível verificar quais barras mais sensíveis à variação do parâmetro λ . O termo desconhecido $\frac{dV_i}{d\lambda_{\lambda_1}}$ da expressão (2.15), são as entradas do vetor (2.18).

O sistema de equações é formado pelas expressões (2.13), (2.14) e (2.15). Essas equações podem ser expressas na forma matricial.

$$\begin{bmatrix} \lambda_0 \\ \lambda_1 \\ 1,0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & V_{i,0} & V_{i,0}^2 \\ 1 & V_{i,1} & V_{i,1}^2 \\ 0 & \frac{dV_i}{d\lambda_1} & 2 \frac{dV_i}{d\lambda_1} V_{i,1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Resolvendo o sistema (2.19) determinam-se α, β e γ . Para determinar o índice $V_{crítico}$ é necessário encontrar o ponto de máximo da expressão (2.12), isto é:

$$\begin{aligned} \frac{d\lambda}{dV_i} &= 0 \\ \frac{d}{dV_i}(\alpha + \beta V_1 + \gamma V_i^2) &= 0 \\ \beta + 2\gamma V_1 &= 0 \\ V_{crítico} &= \frac{-\beta}{2\gamma} \end{aligned} \quad (2.20)$$

Para encontrar o $\lambda V_{crítico}$, deve-se substituir a expressão (2.20) em (2.12)

$$\begin{aligned}
\lambda V_{crítico} &= \alpha + \beta \left(\frac{-\beta}{2\gamma} \right) + \lambda \left(\frac{-\beta}{2\gamma} \right)^2 \\
\lambda V_{crítico} &= \alpha - \frac{-\beta^2}{2\gamma} + \lambda \frac{-\beta^2}{4\gamma^2} \\
\lambda V_{crítico} &= \alpha - \frac{-\beta^2}{2\gamma} + \frac{\beta^2}{4\gamma} \\
\lambda V_{crítico} &= \frac{4\gamma\alpha - 2\beta^2 + \beta^2}{4\gamma} \\
\lambda V_{crítico} &= \frac{4\gamma\alpha - \beta^2}{4\gamma} \\
\lambda V_{crítico} &= \alpha - \frac{\beta^2}{4\gamma} \tag{2.21}
\end{aligned}$$

Como foi mencionado anteriormente, a barra piloto é aquela que possui maior variação de tensão relativa entre as barras de carga do sistema. Esta barra também apresenta mudança significativa no ângulo, então, deve-se repetir todo o procedimento de ajuste para a curva $\lambda - \theta$. Esta curva apresenta a mesma propriedade quadrática da curva λxV próxima ao ponto de bifurcação sela nó. O cálculo de $\lambda\theta_{crítico}$ é feito de forma análoga, desta forma será apresentado apenas a forma final.

$$\lambda\theta_{crítico} = \eta - \frac{\varphi^2}{4\tau} \tag{2.22}$$

Sendo η , φ e τ incógnitas a determinar. Essas incógnitas são determinadas da mesma forma que os parâmetros α , β e γ conforme a expressão (2.19). Obtidos os parâmetros η , φ e τ , determina-se o carregamento máximo aproximado de $\lambda\theta_{crítico}$.

2.4 LOOK AHEAD MODIFICADO

O método “*look ahead* modificado” não utiliza a expressão (2.19). O terceiro ponto necessário para encontrar as incógnitas do problema é adquirido por um segundo fluxo de potência continuado ou três fluxos de potência (caso base mais

dois), utilizando a metodologia do fluxo de potência continuado. Tal procedimento visa melhorar a estimativa do ponto de bifurcação em relação ao *look ahead* tradicional (MARTINS, 2011).

Assim o novo sistema passa a ser:

$$\begin{bmatrix} \lambda_0 \\ \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & V_{i,0} & V_{i,0}^2 \\ 1 & V_{i,1} & V_{i,1}^2 \\ 1 & V_{i,2} & V_{i,2}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Basta então utilizar as equações (2.20) e (2.21) para obter o $V_{i_{critico}}$ e o $\lambda_{\theta_{critico}}$.

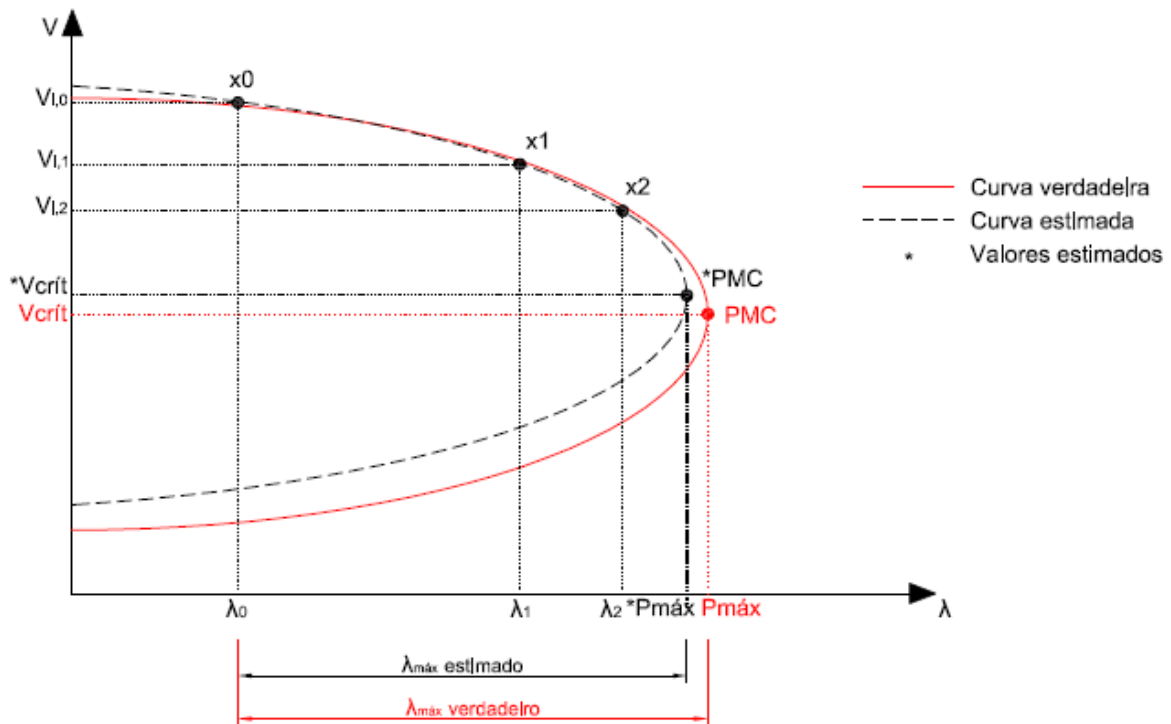


Figura 5: Determinação do máximo carregamento do sistema através do ajuste da Curva $\lambda \times V$ considerando 3 fluxos de potência.

No próximo capítulo será apresentado o desenvolvimento do algoritmo em Matlab para análise de estabilidade de tensão utilizando o método “*look ahead* modificado”.

3 DESENVOLVIMENTO DOS ALGORITMOS

3.1 INTRODUÇÃO

Para a representação do desenvolvimento dos algoritmos, tanto do FPC, quanto do "*look ahead* modificado", fez-se uso de fluxogramas, a fim de estruturar a lógica envolvida em cada um dos casos, além de construir, bloco a bloco, a dinâmica dos métodos.

3.2 ALGORITMO DESENVOLVIDO DO FLUXO DE POTÊNCIA CONTINUADO

O fluxograma do algoritmo utilizado para implementar o FPC está ilustrado na Figura 6.

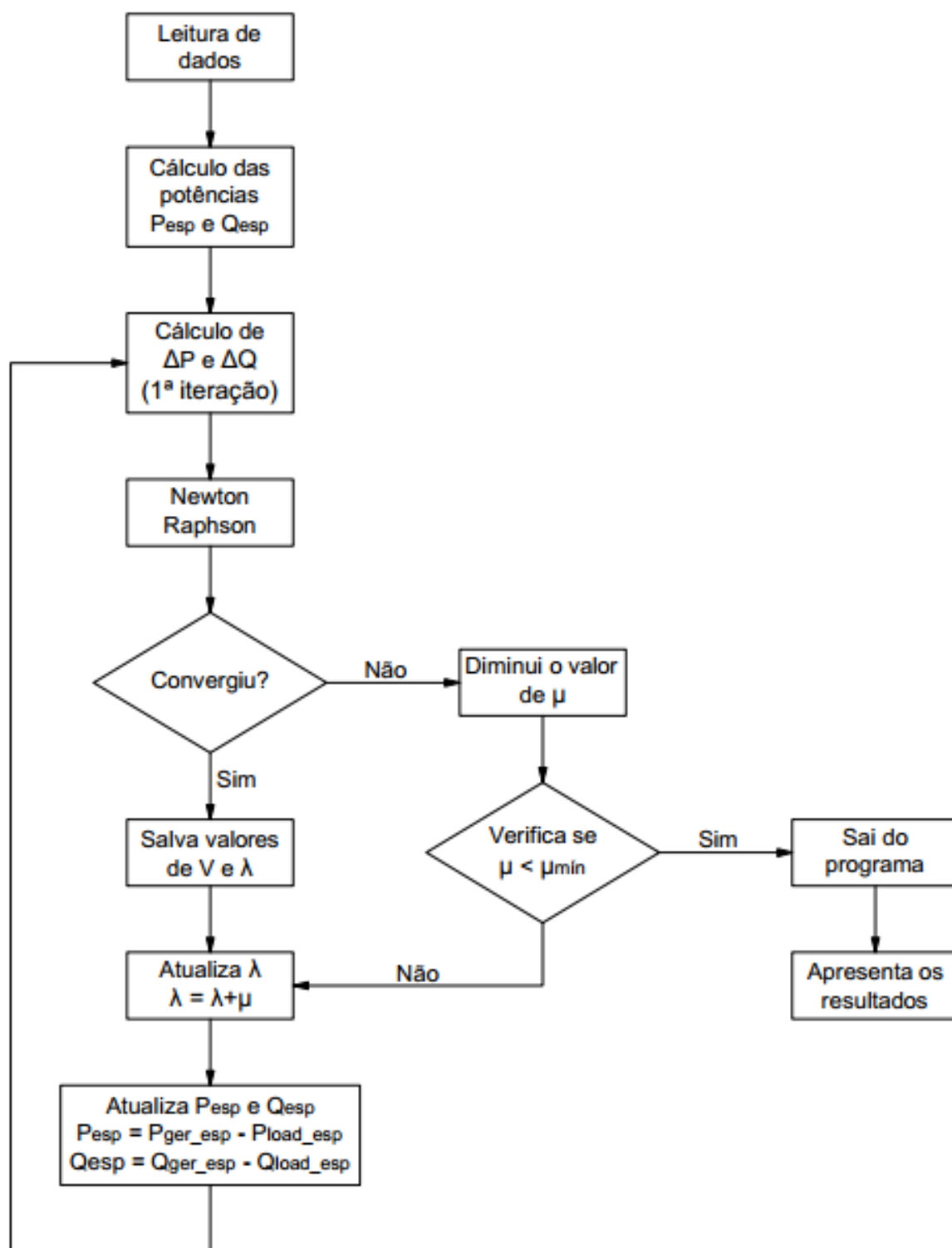


Figura 6: Fluxograma do algoritmo do FPC

Na figura 6, μ representa o passo, ou seja, o valor do incremento de carga ($\Delta\lambda$).

Durante o desenvolvimento do algoritmo do FPC, as potências líquidas especificadas P_{esp} e Q_{esp} foram parametrizadas em função de λ , que possui valor inicial unitário, para facilitar a etapa de incremento de carga.

$$P_i^{esp}(\lambda) = P_i^{ger}(\lambda) - P_i^{load}(\lambda) \quad (3.1)$$

$$Q_i^{esp}(\lambda) = Q_i^{ger}(\lambda) - Q_i^{load}(\lambda) \quad (3.2)$$

Onde “i” indica o número da barra, e as novas potências de geração e carga são recalculadas conforme as equações (3.3) a (3.6):

$$P_i^{ger}(\lambda) = [P_i^{ger_{inicial}} + Fp_{ger} * P_{total_{base}} * (\lambda - 1)] \quad (3.3)$$

$$P_i^{load}(\lambda) = [P_i^{load_{inicial}} + Fp_{load} * P_{total_{base}} * (\lambda - 1)] \quad (3.4)$$

$$Q_i^{ger}(\lambda) = 0 \text{ (barras PQ)} \quad (3.5)$$

$$Q_i^{load}(\lambda) = \left[\left(\frac{Q_i^{load_{inicial}}}{P_i^{load_{inicial}}} \right) * P_i^{load}(\lambda) \right] \quad (3.6)$$

Onde:

Fp é o fator de participação, de geração ou carga, da barra.

$P_{total_{base}}$ é a soma das potências ativas de carga, considerando o caso base.

Os fatores de participação são utilizados para ajustar tanto a carga individual, quanto a geração individual das barras a cada execução do FPC (BENEDITO; JUSTI, 2016).

Este incremento de carga considera o fator de potência constante, ou seja, P_{esp} e Q_{esp} são incrementados de forma proporcional, a fim de manter seu fator de potência.

3.3 ALGORITMO DESENVOLVIDO DO LOOK AHEAD MODIFICADO

O algoritmo do “*look ahead* modificado” foi implementado a partir do algoritmo do FPC, já que o método baseia-se na resolução consecutiva de três fluxos de potência convencionais para a estimativa do ponto crítico.

Desta maneira, foram realizadas as adaptações necessárias para a obtenção dos resultados através do “*look ahead* modificado”, como mostra a Figura 7.

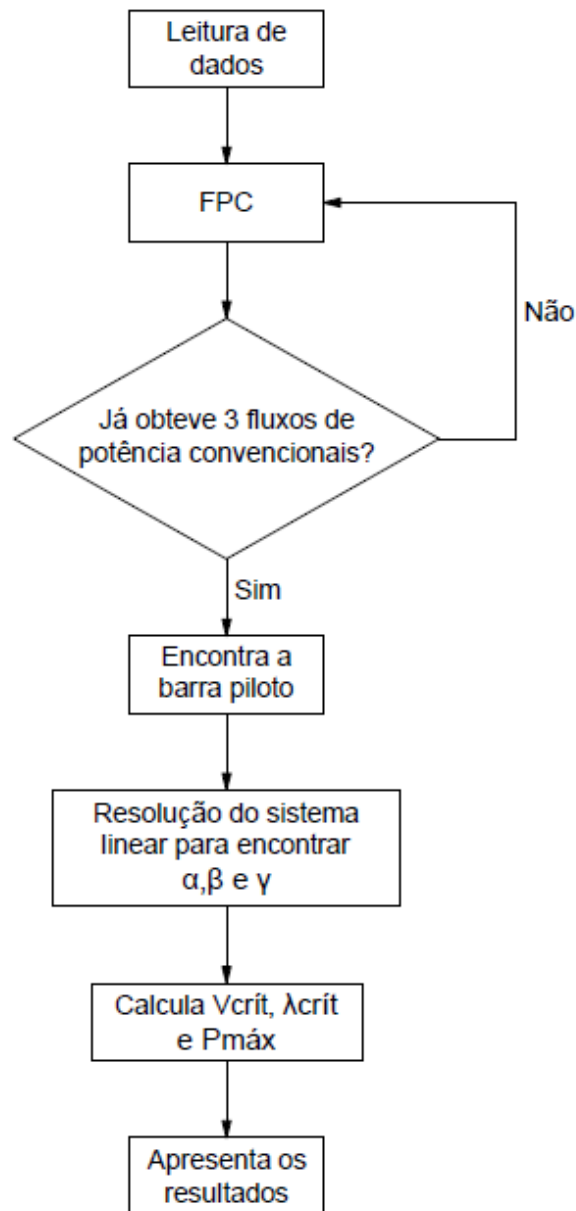


Figura 7: Fluxograma do algoritmo do "look ahead modificado"

Para o desenvolvimento do programa, foi inserido um laço de controle de número de convergências sobre o algoritmo do FPC, limitando-se em três resultados do fluxo de potência convencional. Após a obtenção dos três pontos, o programa procura pela barra piloto de tensão, para fazer a estimativa do quarto ponto a partir de seus dados.

Em seguida, através da resolução do sistema linear descrito na equação (2.23), encontram-se as variáveis α , β e γ .

Por fim, encontram-se os valores de V_{crit} e λ_{crit} , utilizando as equações (2.20) e (2.21), respectivamente.

No próximo capítulo serão apresentados os resultados das simulações realizadas, utilizando sistemas conhecidos na literatura – o sistema de 5 barras de Stagg e El-Abiad, e o sistema de 14 barras do IEEE.

4 RESULTADOS

4.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos em simulações usando o programa desenvolvido com o método “*look ahead* modificado”. Foram utilizados sistemas testes conhecidos da literatura, como o sistema de 5 barras (Stagg e El-Abiad, 1982) e o sistema de 14 barras do IEEE.

4.2 SISTEMA DE 5 BARRAS

Considere o sistema de 5 barras ilustrado pela Figura 8.

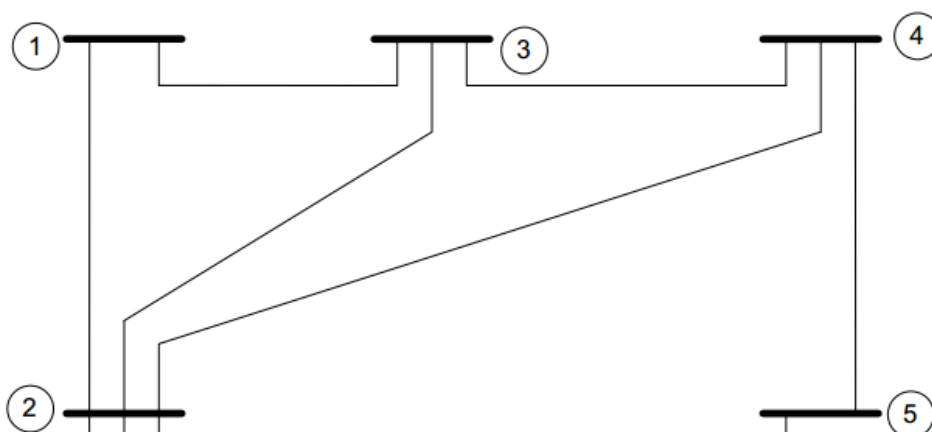


Figura 8: Sistema de 5 barras
Fonte: Adaptado de Stagg e El-Abiad (1982, p.427)

As Tabelas 1, 2 e 3 apresentam os dados iniciais utilizados na implementação dos algoritmos para análise de estabilidade de tensão.

Tabela 1: Dados de barras para o sistema de 5 barras

Barra	Tipo de Barra	Ângulo	Tensão (pu)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (MVar)	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (MVar)
1	2	0	1,06	0,00	0,00	0,00	0,00
2	1	0	1,04	50,70	0,00	0,00	0,00
3	0	0	1,00	0,00	0,00	47,90	19,30
4	0	0	1,00	0,00	0,00	42,90	7,90
5	0	0	1,00	0,00	0,00	62,90	12,90

Onde os tipos de barra foram convencionados da seguinte maneira:

- Tipo 0 → Barra de carga (PQ)
- Tipo 1 → Barra de geração (PV)
- Tipo 2 → Barra *slack* ou de referência ($V\theta$)

Tabela 2: Fatores de participação de geração e de carga

Barra	Participação de Geração	Participação de Carga
1	50%	0%
2	50%	0%
3	0%	33,33%
4	0%	33,33%
5	0%	33,34%

Tabela 3: Dados de linha do sistema de 5 barras

De	Para	Resistencia (R%)	Reatância (X%)	Admitância(B_sh%)	Tap
1	2	2,0	6,0	3,0	1,0
1	3	8,0	24,0	2,5	1,0
2	3	6,0	18,0	2,0	1,0
2	4	6,0	18,0	2,0	1,0
2	5	4,0	12,0	1,5	1,0
3	4	1,0	3,0	1,0	1,0
4	5	8,0	24,0	2,5	1,0

Através dos dados referentes ao sistema de 5 barras, foram aplicados os algoritmos do FPC e, em seguida, do "look ahead modificado" para fins de comparação de resultados. Foram realizadas diversas simulações – utilizando duas barras PQ do sistema, sendo uma delas a barra piloto de tensão, e outra, a barra menos sensível do sistema – alterando apenas o valor do passo inicial do método "look ahead modificado".

Para o FPC, o passo – ou incremento de carga – inicial utilizado foi $\Delta\lambda=\mu=0,1$, e o valor do incremento mínimo de carga utilizado foi de 0,005. Neste caso, o programa obteve 45 pontos de convergência no total.

Para o método “*look ahead* modificado”, foram utilizados diferentes valores de incremento de carga, com o intuito de verificar o efeito da escolha do incremento de carga na resposta dessa metodologia. É importante salientar que toda vez que o programa obtiver solução divergente, o incremento de carga será diminuído. Neste trabalho, diminui-se o incremento de carga dividindo-o por 2. Desse modo, garante-se sempre 3 soluções do fluxo de potência, viabilizando a aplicação do *look ahead* modificado.

A Figura 9 apresenta o resultado do FPC para todas as barras de carga do sistema.

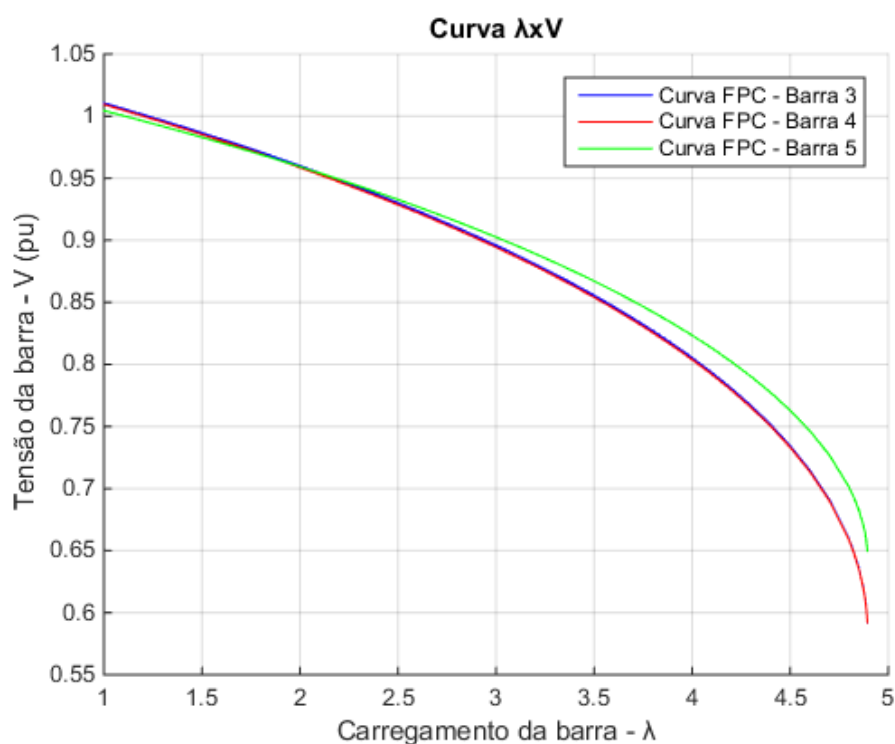


Figura 9: FPC das barras de carga – Sistema de 5 barras

Aplicando o algoritmo do “*look ahead*” modificado para a barra 3 e utilizando incremento de carga inicial $\Delta\lambda=0,4$ foram obtidos os valores de λ , V e V^2 conforme a tabela 4. A partir desses valores e utilizando a expressão dos sistema linear

representada pela equação (2.23), foram obtidos os valores de α , β e γ , que também estão contidos na tabela 4.

Tabela 4: Resultados parciais do look ahead modificado para a barra 3 quando $\Delta\lambda=0,4$

λ	V	V ²
1,0	1,0094	1,018888
1,4	0,9903	0,980694
1,8	0,9696	0,940124

α	β	γ
-17,4462	58,1987	-39,5524

A Figura 10 ilustra a curva $\lambda \times V$ das barras 3 e 5 – a barra piloto de tensão e a barra menos sensível, respectivamente. Neste primeiro cenário, foi utilizado o valor do incremento de carga inicial $\Delta\lambda=0,4$.

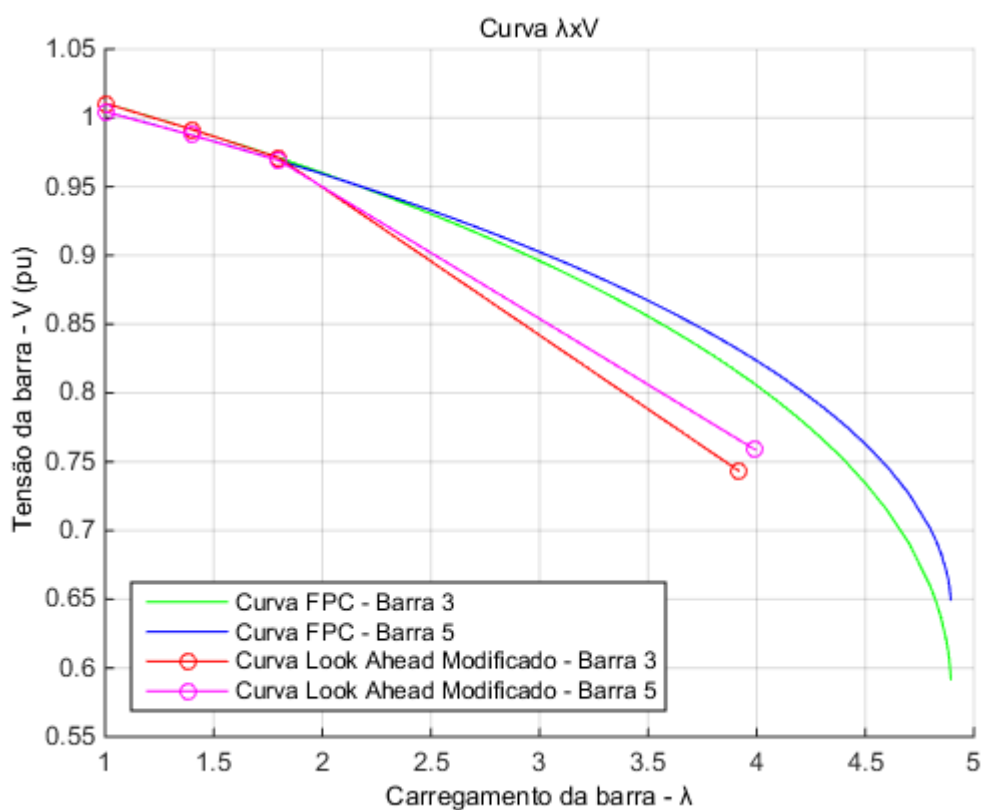


Figura 10: Curva $\lambda \times V$, para $\Delta\lambda=0,4$

Os valores de $V_{crítico}$, $\lambda_{crítico}$ e $P_{máx}$ obtidos através dos dois métodos foram organizados na tabela 5, para facilitar a comparação dos resultados.

Para cada uma dessas variáveis, foi calculado o erro relativo entre os resultados obtidos, através da equação (4.1):

$$\text{Erro relativo} = \frac{\text{Valor FPC} - \text{Valor look ahead modificado}}{\text{Valor FPC}} \quad (4.1)$$

Tabela 5: Dados obtidos quando $\Delta\lambda=0,4$

	Barra 3		Barra 5	
	$\lambda_{\text{crítico}}$	$V_{\text{crítico}}$	$\lambda_{\text{crítico}}$	$V_{\text{crítico}}$
FPC	4.89375	0.59201	4.89375	0.64968
Look Ahead Modificado	3.91668	0.74341	3.99368	0.75868
Erros	19.97%	-25.57%	18.39%	-16.78%

Para análise de um segundo cenário, foi realizada a mesma simulação para as barras 3 e 5, desta vez, utilizando o passo inicial $\Delta\lambda=1,0$. Os resultados podem ser observados na Figura 11, os resultados parciais na tabela 6 – de forma análoga utilizando a expressão (2.23) – e os erros na tabela 7.

Tabela 6 Resultados parciais do look ahead modificado para a barra 3 quando $\Delta\lambda=1,0$

λ	v	v^2
1,0	1,0094	1,018888
2,0	0,9585	0,918722
3,0	0,8943	0,799772

α	β	γ
-13,399	49,9819	-35,3844

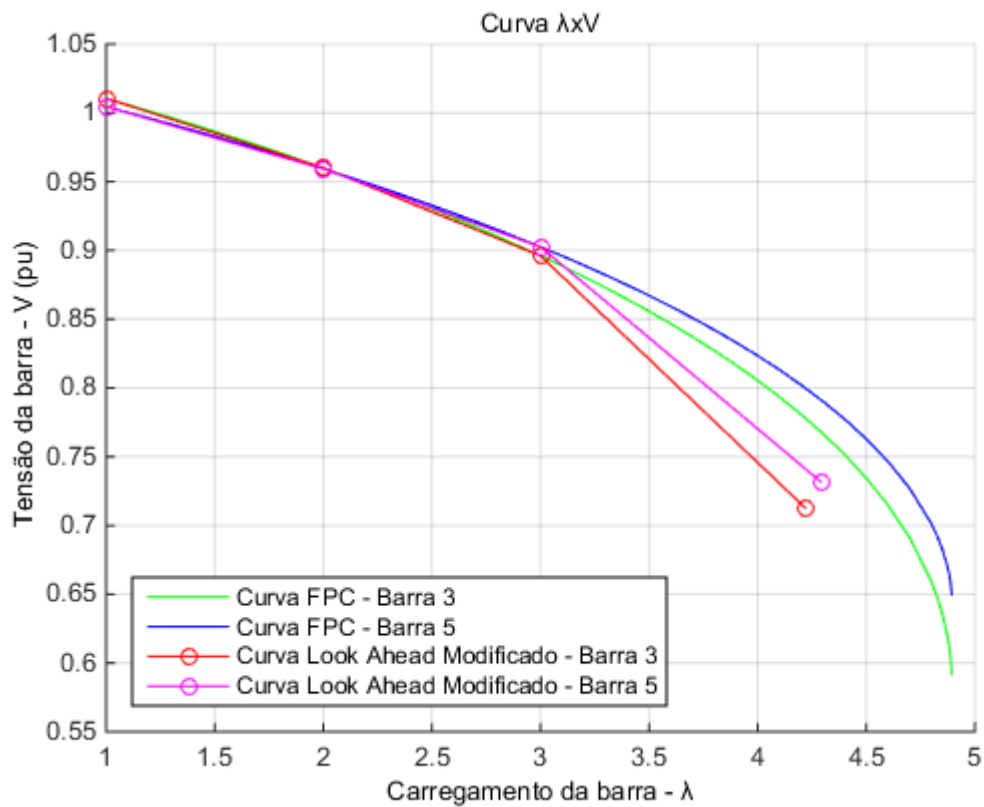


Figura 11: Curva $\lambda \times V$, para $\Delta\lambda=1,0$

Tabela 7: Dados obtidos quando $\Delta\lambda=1,0$

	Barra 3		Barra 5	
	$\lambda_{\text{crítico}}$	$V_{\text{crítico}}$	$\lambda_{\text{crítico}}$	$V_{\text{crítico}}$
FPC	4.89375	0.59201	4.89375	0.64968
Look Ahead Modificado	4.21909	0.71278	4.29047	0.73182
Erros	13.79%	-20.40%	12.33%	-12.64%

Os erros relativos foram calculados através da equação (4.1). Percebe-se que apesar dos valores dos erros terem diminuído, o resultado obtido pelo “*look ahead* modificado” ainda não é satisfatório.

Em sequência, para análise de um terceiro cenário, foram realizadas as mesmas simulações para as barras 3 e 5, utilizando, desta vez, o incremento de carga inicial $\Delta\lambda=1,5$. Os resultados podem ser observados na Figura 12, tabela 8 e na tabela 9.

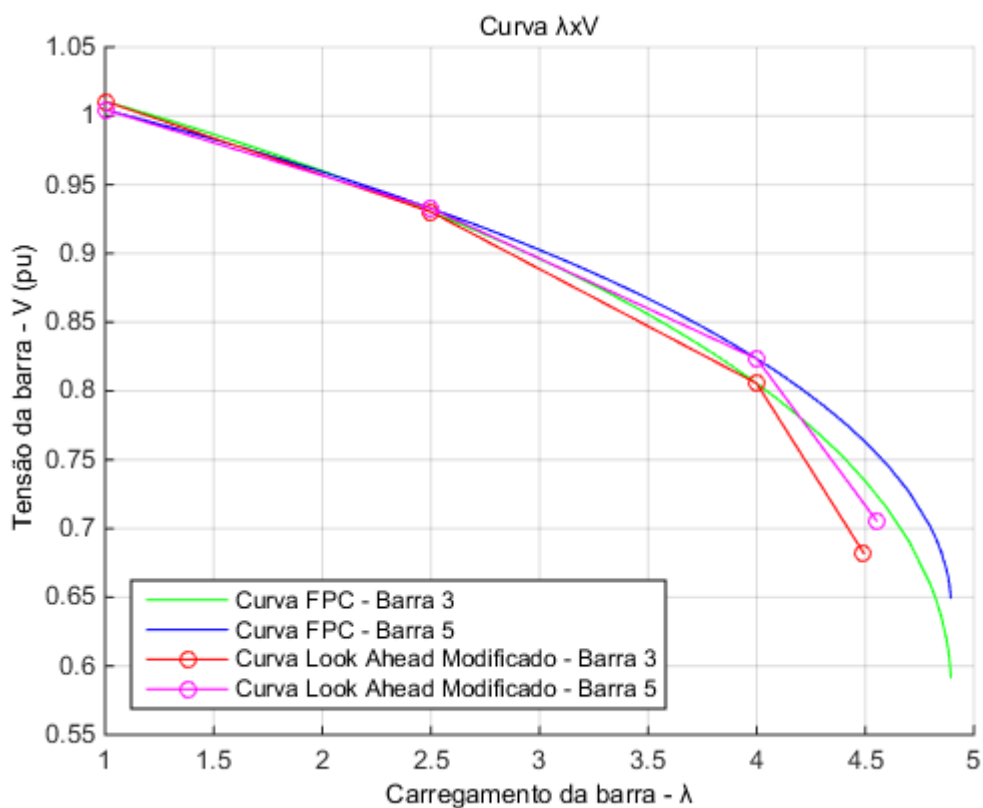


Figura 12: Curva $\lambda \times V$, para $\Delta\lambda=1,5$

Tabela 8: Resultados parciais do look ahead modificado para a barra 3 quando $\Delta\lambda=1,5$

λ	v	v^2
1,0	1,0094	1,018888
2,5	0,9286	0,862298
4,0	0,8038	0,646094

α	β	Γ
-10,0441	43,0061	-31,7662

Tabela 9: Dados obtidos quando $\Delta\lambda=1,5$

	Barra 3		Barra 5	
	$\lambda_{\text{crítico}}$	$v_{\text{crítico}}$	$\lambda_{\text{crítico}}$	$v_{\text{crítico}}$
FPC	4.89375	0.59201	4.89375	0.64968
Look Ahead Modificado	4.49263	0.68207	4.55136	0.70575
Erros	8.20%	-15.21%	7.00%	-8.63%

Novamente, os erros relativos foram calculados através da equação (4.1), e pode-se observar uma melhoria nos valores, comparados aos cenários anteriores.

Em última análise, repetiram-se as simulações, utilizando o incremento de carga inicial $\Delta\lambda=3,0$. Os resultados podem ser observados na Figura 13, tabela 10 e na tabela 11.

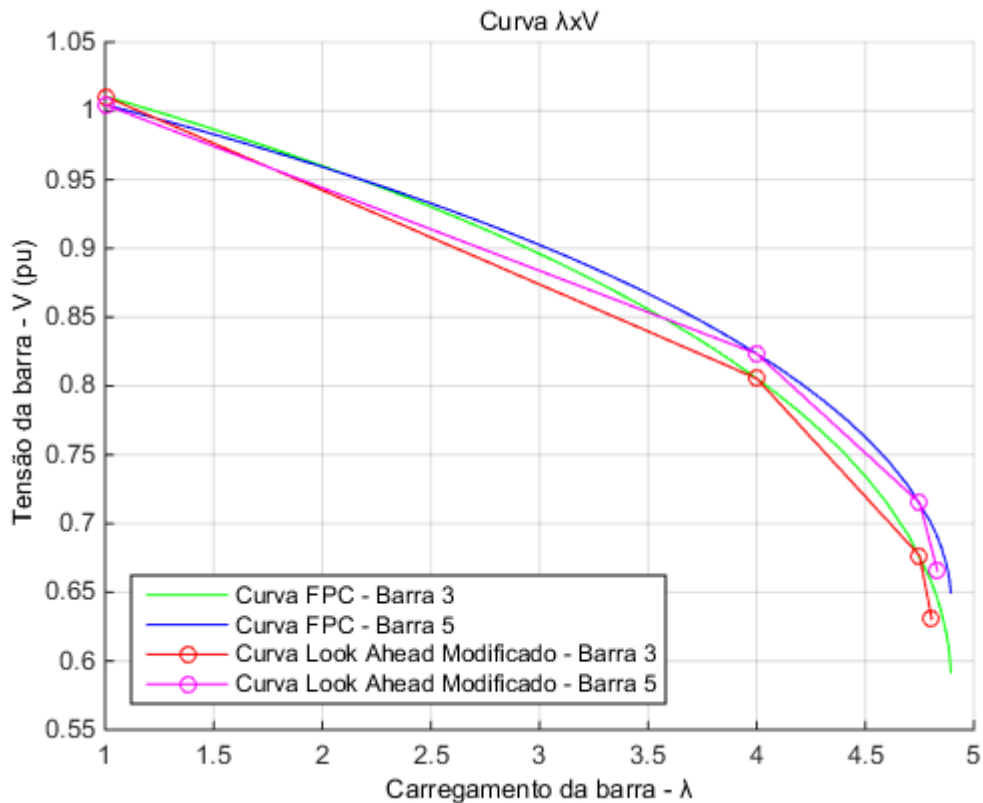


Figura 13: Curva $\lambda \times V$, para $\Delta\lambda=3,0$

Tabela 10: Resultados parciais do look ahead modificado para a barra 3 quando $\Delta\lambda=3,0$

λ	v	v^2
1,0	1,0094	1,018888
4,0	0,8038	0,646094
4,8	0,6758	0,456706

α	β	Γ
-5,5162	32,8872	-26,1854

Tabela 11: Dados obtidos quando $\Delta\lambda=3,0$

	Barra 3		Barra 5	
	$\lambda_{\text{crítico}}$	$V_{\text{crítico}}$	$\lambda_{\text{crítico}}$	$V_{\text{crítico}}$

FPC	4.89375	0.59201	4.89375	0.64968
Look Ahead Modificado	4.80586	0.63058	4.83245	0.66544
Erros	1.80%	-6.51%	1.25%	-2.43%

Da mesma maneira que os cenários anteriores, foi calculado o erro relativo de todos os parâmetros, onde pode-se observar uma boa aproximação dos resultados obtidos pelo “*look ahead* modificado”, em comparação com os resultados obtidos pelo FPC.

Ao comparar as duas barras escolhidas para as simulações, percebe-se que não houve muita diferença entre os valores dos erros obtidos, pois ambas possuem um comportamento semelhante, apesar dos seus valores absolutos serem diferentes.

Verifica-se também, que apesar dos valores dos resultados variarem conforme o aumento do incremento de carga inicial, as estimativas obtidas pelo “*look ahead* modificado” foram mais conservadoras, proporcionando uma maior margem de segurança para o sistema.

4.3 SISTEMA DE 14 BARRAS

Considere o sistema de 14 barras ilustrado pela Figura 14.

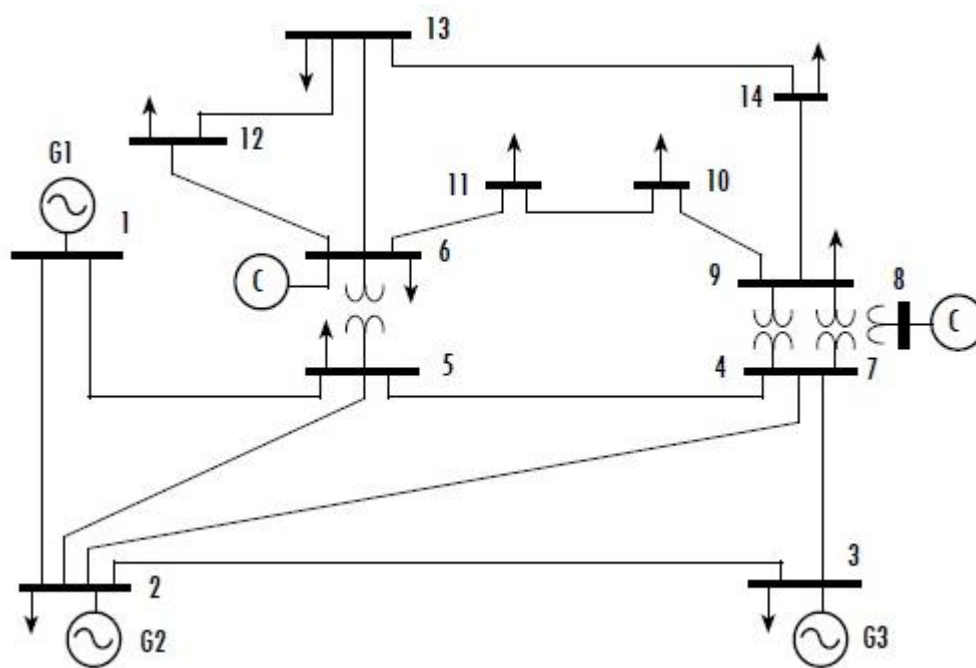


Figura 14: Sistema de 14 barras do IEEE
Fonte: Lopez-Lezama; Granada-Echeverri; Gallego-Pareja, 2009.

O sistema de 14 barras ilustrado pela Figura 14 representa uma parte do sistema elétrico de potência dos Estados Unidos da América.

Esta representação difere do sistema de 5 barras por ter transformadores conectados a algumas barras, onde há mudança no nível de tensão. Os transformadores de dois enrolamentos são reduzidos a uma reatância equivalente, o transformador de três enrolamentos é tratado como três reatâncias arranjadas em estrela. Vale ressaltar o fato de que o sistema considerado possui fisicamente 13 barras, contudo, é somado o barramento número 7 uma vez que ele surge quando o transformador de três enrolamentos é considerado como uma estrela de impedâncias para a configuração da matriz admitância. (KARP; OLIVEIRA; SANTOS, 2013).

As Tabelas 12, 13 e 14 apresentam os dados iniciais utilizados na implementação dos algoritmos para análise de estabilidade de tensão.

Tabela 12: Dados de barra do sistema de 14 barras

Barra	Tipo de Barra	Tensão (pu)	Ângulo (rad)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (MVar)	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (MVar)
1	2	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	1	1,00	0,00	40,00	0,00	21,70	12,70
3	1	1,00	0,00	0,00	0,00	94,20	19,00
4	0	1,00	0,00	0,00	0,00	47,80	-3,90
5	0	1,00	0,00	0,00	0,00	7,60	1,60
6	1	1,00	0,00	0,00	0,00	11,20	7,50
7	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	1	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	0	1,00	0,00	0,00	0,00	29,50	16,60
10	0	1,00	0,00	0,00	0,00	9,00	5,80
11	0	1,00	0,00	0,00	0,00	3,50	1,80
12	0	1,00	0,00	0,00	0,00	6,10	1,60
13	0	1,00	0,00	0,00	0,00	13,50	5,80
14	0	1,00	0,00	0,00	0,00	14,90	5,00

Onde os tipos de barra foram convencionados da seguinte maneira:

- Tipo 0 → Barra de carga (PQ)
- Tipo 1 → Barra de geração (PV)
- Tipo 2 → Barra *slack* ou de referência ($V\theta$)

Tabela 13:Fatores de participação de geração e de carga

Barra	Participação de Geração	Participação de Carga
1	70%	0%
2	30%	9,09%
3	0%	9,09%
4	0%	9,09%
5	0%	9,09%
6	0%	9,09%
7	0%	0%
8	0%	0%
9	0%	9,09%
10	0%	9,09%
11	0%	9,09%
12	0%	9,09%
13	0%	9,09%
14	0%	9,09%

Tabela 14:Dados de linha do sistema de 14 barras

De	Para	Resistencia (R%)	Reatância (X%)	Admitância (B_sh%)	Tap
1	2	1,938	5,917	5,28	1,000
1	5	5,403	22,304	4,92	1,000
2	3	4,699	19,797	4,38	1,000
2	4	5,811	17,632	3,74	1,000
2	5	5,695	17,388	3,40	1,000
3	4	6,701	17,103	3,46	1,000
4	5	1,335	4,211	1,28	1,000
4	7	0,000	20,912	0,00	0,978
4	9	0,000	55,618	0,00	0,969
5	6	0,000	25,202	0,00	0,932
6	11	9,498	19,890	0,00	1,000
6	12	12,291	25,581	0,00	1,000
6	13	6,615	13,027	0,00	1,000
7	8	0,000	17,615	0,00	1,000
7	9	0,000	11,001	0,00	1,000
9	10	3,181	8,450	0,00	1,000
9	14	12,711	27,038	0,00	1,000
10	11	8,205	19,207	0,00	1,000
12	13	22,092	19,988	0,00	1,000
13	14	17,093	34,802	0,00	1,000

Através dos dados referentes ao sistema de 14 barras, foram aplicados os algoritmos do FPC e, em seguida, do "look ahead modificado" para fins de

comparação de resultados. Foram realizadas diversas simulações, alterando apenas o valor do passo inicial do método “*look ahead* modificado”.

De forma análoga à análise do sistema de 5 barras, serão utilizadas duas barras PQ do sistema, sendo elas a barra piloto de tensão e a barra menos sensível. Além disso, manteve-se a premissa do incremento de carga $\Delta\lambda=\mu=0,1$ e o valor do incremento mínimo de carga utilizado de 0,005. Nesta análise, o programa obteve 22 pontos de convergência no total.

Analogamente, foram obtidos os valores de λ , V e V^2 . A partir desses valores e utilizando a expressão do sistema linear representada pela equação (2.23), foram obtidos os valores de α , β e γ . Os resultados se encontram nas tabelas 16, 18 e 20 respectivamente.

A Figura 15 representa o resultado do FPC para todas as barras de carga do sistema de 14 barras.

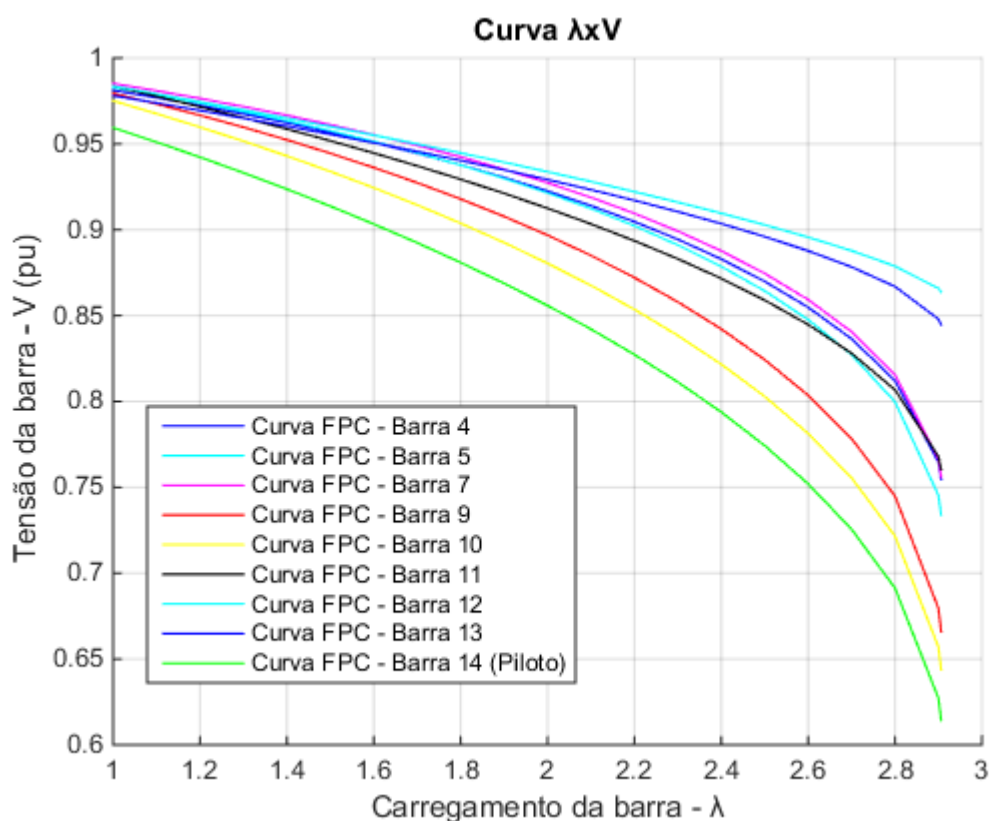


Figura 15: FPC das barras de cargas – Sistema de 14 barras

A Figura 16 ilustra a curva $\lambda \times V$ das barras 14 e 12 – a barra piloto de tensão e a barra menos sensível, respectivamente – utilizando o passo inicial $\Delta\lambda=0,4$.

O método “*look ahead* modificado” se baseia no comportamento quadrático da curva, uma vez que a barra 12 não apresenta essa característica, o ponto de convergência é mal estimado, conforme mostra a Figura 16.

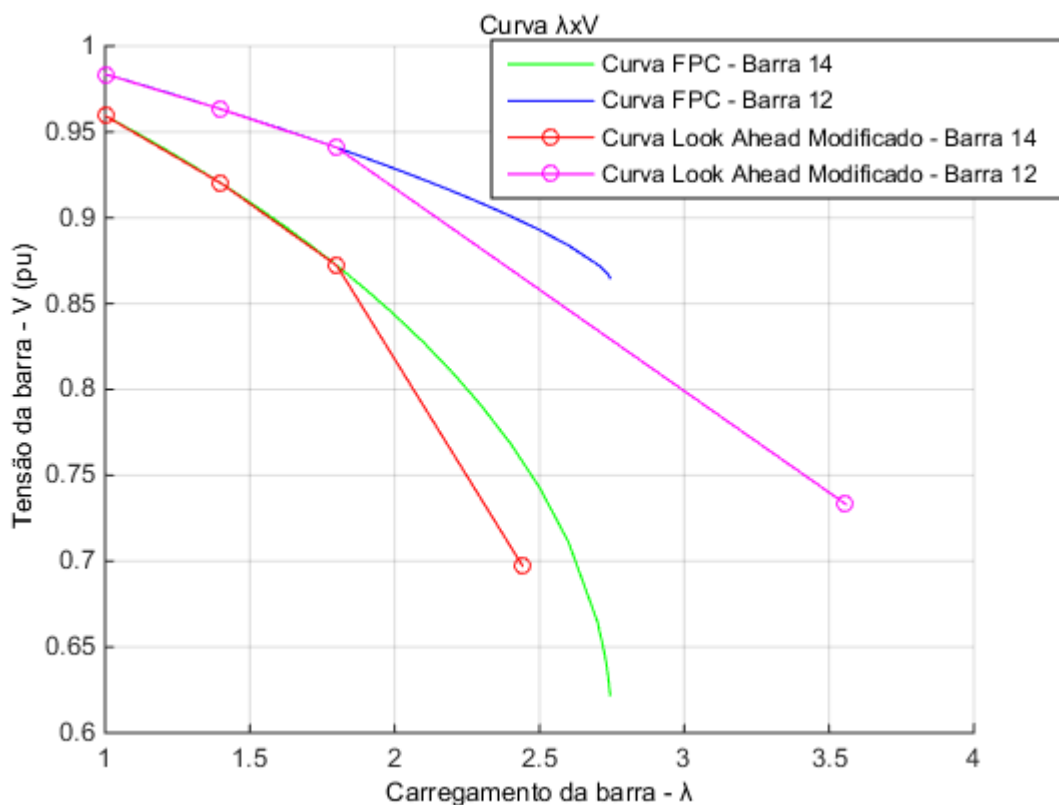


Figura 16: Curva $\lambda \times V$, para $\Delta\lambda=0,4$

Analogamente ao sistema de 5 barras, os valores de $V_{crítico}$, $\lambda_{crítico}$ e $P_{máx}$ obtidos através dos métodos, foram organizados conforme apresentados na tabela 15, desta forma, estabelece-se os erros relativos das barras utilizando a expressão (4.1).

Tabela 15: Dados obtidos quando $\Delta\lambda=0,4$

	Barra 14		Barra 12	
	$\lambda_{crítico}$	$V_{crítico}$	$\lambda_{crítico}$	$V_{crítico}$
FPC	2.7438	0.6219	2.7438	0.8650
Look Ahead Modificado	2.4409	0.6973	3.5575	0.7332
Erros	11.04%	-12.12%	-29.66%	15.23%

Os resultados parciais são ilustrados conforme mostra a tabela 16.

Tabela 16: Resultados parciais do look ahead modificado para a barra 14 quando $\Delta\lambda=0,4$

λ	v	v^2
-----------	-----	-------

1,0	0,9594	0,920448
1,4	0,9232	0,852298
1,8	0,8809	0,775985
α	β	γ
-8,8961	32,6458	-23,2755

Em sequência, a figura 16 ilustra a curva $\lambda x V$ das barras 4 e 14, utilizando o passo inicial $\Delta\lambda = 1,0$. A Figura 17 ilustra os resultados, que podem ser comparados na tabela 17. Os coeficientes são determinados conforme a tabela 18.

Nota-se que para o incremento de carga de $\Delta\lambda = 1,0$ os erros relativos obtidos através da expressão (4.1) são reduzidos consideravelmente. No entanto, a barra 12 ainda apresenta uma estimativa ruim, devido às características da curva.

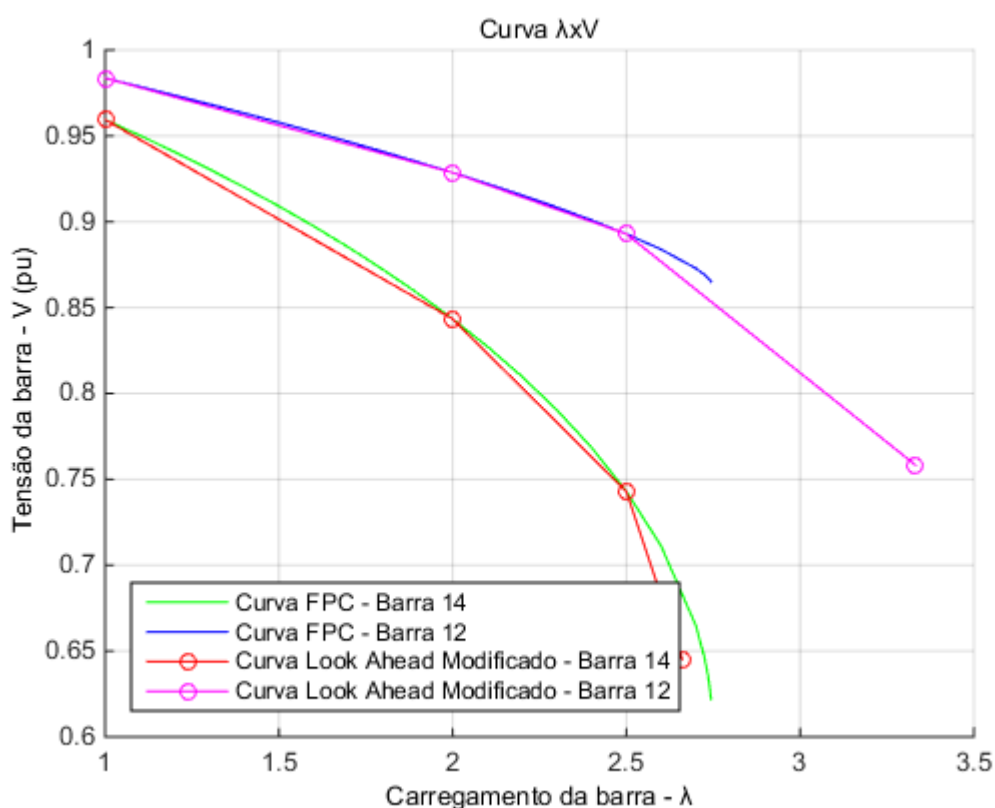


Figura 17: Curva $\lambda x V$, para $\Delta\lambda=1,0$

Tabela 17: Dados obtidos quando $\Delta\lambda=1,0$

	Barra 14		Barra 12	
	$\lambda_{\text{crítico}}$	$V_{\text{crítico}}$	$\lambda_{\text{crítico}}$	$V_{\text{crítico}}$
FPC	2.7438	0.6219	2.7438	0.8650
Look Ahead Modificado	2.6605	0.6452	3.3324	0.7582
Erros	3.04%	-3.74%	-21.45%	12.34%

Tabela 18: Resultados parciais do look ahead modificado para a barra 14 quando $\Delta\lambda=1,0$

λ	v	v^2
1,0	0,9594	0,920448
2,0	0,8559	0,732565
3,0	0,7743	0,59954

α	β	γ
-5,3868	24,9439	-19,0603

Para concluir as simulações, novamente utilizando as barras 4 e 14 do sistema, foi considerado o incremento de carga $\Delta\lambda = 1,5$.

A Figura 18 ilustra a curva $\lambda \times V$ das barras em análise e a tabela 19 compara os resultados obtidos. Os coeficientes foram determinados conforme tabela 20.

Nesse último caso, a estimativa do método "look ahead modificado" é satisfatória – para a barra 14 – quando comparada com o FPC, já que os erros relativos, obtidos através da expressão (4.1), são muito pequenos, mostrando que quanto maior for o incremento de carga, melhor a aproximação do PMC do sistema.

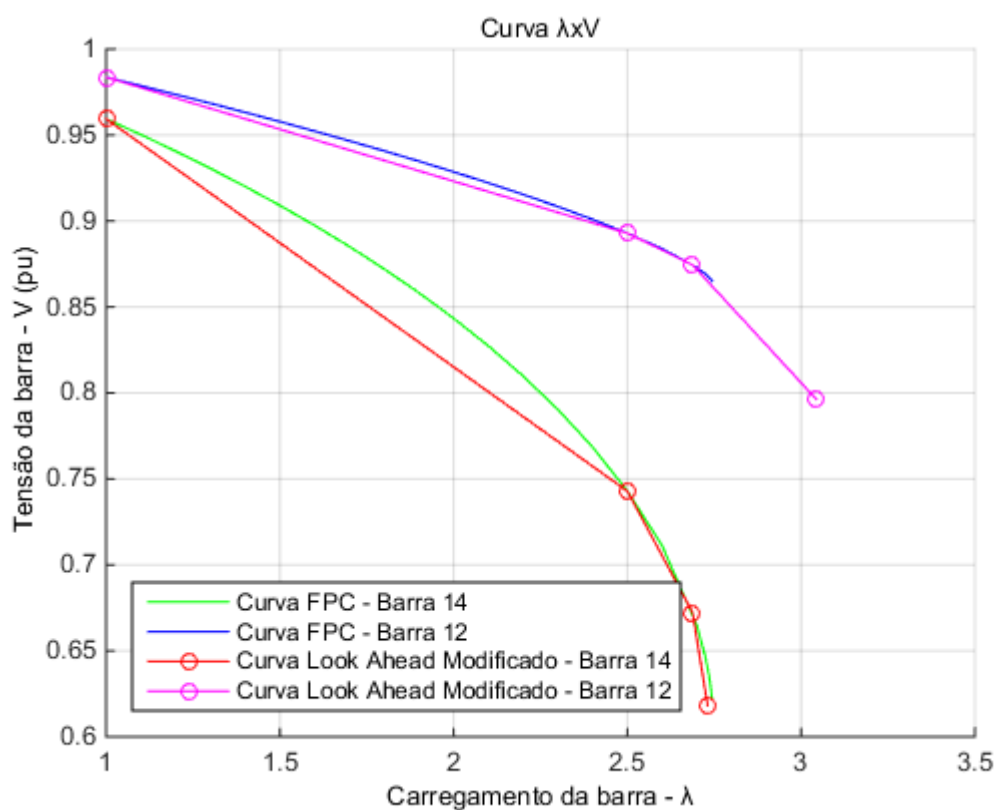


Figura 18: Curva $\lambda x V$, para $\Delta\lambda=1,5$

Tabela 19: Dados obtidos quando $\Delta\lambda=1,5$

	Barra 14		Barra 12	
	λ crítico	V crítico	λ crítico	V crítico
FPC	2.7438	0.6219	2.7438	0.8650
Look Ahead Modificado	2.7308	0.6183	3.0442	0.7961
Erros	0.47%	0.58%	-10.95%	7.96%

Tabela 20: Resultados parciais do look ahead modificado para a barra 14 quando $\Delta\lambda=1,5$

λ	V	V^2
1,0	0,9594	0,920448
2,5	0,7743	0,59954
4,0	0,6518	0,424843

α	β	Γ
-3,3951	20,2956	-16,3791

Nota-se que a estimativa obtida pelo “*look ahead modificado*” para a barra 12 não apresenta resultados satisfatórios, visto que seus erros permaneceram altos,

mesmo com o aumento do incremento de carga inicial. Isso acontece devido ao comportamento da barra, que não apresenta a forma quadrática perto do seu PMC, como a maioria das demais barras de carga. Como o método baseia-se na aproximação da curva de carga para uma parábola através de estimativa, os resultados acabam sendo ineficientes para curvas que não apresentam este comportamento.

No entanto, para análise de forma geral do sistema, normalmente utiliza-se a curva com maior variação de tensão, ou seja, a barra piloto, visto que ela apresenta maior sensibilidade ao acréscimo de carga no sistema. Sendo assim, o “*look ahead* modificado” ainda apresenta-se como um método eficaz para a análise rápida da margem de estabilidade de tensão de um sistema, desde que seja aplicado à sua barra piloto.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho possui como objetivo realizar um estudo e a implementação de um algoritmo no Matlab, utilizando um dos métodos de análise de estabilidade de tensão, que estima o PMC através do levantamento das curvas de carga ($P \times V$ ou $\lambda \times V$). O método escolhido para tal foi o “*look ahead* modificado”. Este método caracteriza-se por fazer uma avaliação mais rápida do sistema, pois demanda de menos cálculos computacionais, e isso foi o fator determinante para a sua escolha como objeto de estudo.

Tendo em vista os objetivos deste trabalho, pode-se dizer que os mesmos foram atingidos de forma satisfatória, atendendo as suas expectativas iniciais.

Ao longo do desenvolvimento do trabalho, foram observadas algumas dificuldades, principalmente durante a parte de implementação do algoritmo, que foi revisado diversas vezes até que chegasse em sua versão final.

Após a análise dos resultados obtidos, pode-se dizer que o método “*look ahead* modificado” demonstrou-se muito eficiente para a estimativa rápida do ponto crítico de um sistema. Apesar de apresentar uma pequena margem de erro, os resultados produzidos foram mais conservadores que a situação real, tornando a estimativa, além de mais rápida, mais segura.

Pode-se observar também, através das comparações dos resultados para os diversos valores iniciais do incremento de carga, a melhoria na estimativa do PMC, conforme o aumento do tamanho do passo inicial, tanto para o sistema de 5 barras, quanto para o sistema de 14 barras.

Dessa forma, conclui-se que quanto maior for o tamanho do passo inicial, maior a precisão do método, já que o algoritmo faz o auto ajuste do valor do incremento de carga, caso este seja muito grande – a ponto de extrapolar a situação de convergência.

Como sugestões para trabalhos futuros, pode-se explorar, ainda, as análises de estabilidade de tensão, inserindo limites de potência ativa e reativa, ou o controle de tensão através dos tapes dos transformadores.

REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Energia Elétrica. **Relatório de Fiscalização RF-PCTE-01/2010-SFE**. 2010. 14p. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Relat%C3%B3rioDeFiscaliza%C3%A7%C3%A3oPCTE.pdf>>. Acesso em: 18 de maio de 2016.

BENEDITO, Raphael Augusto de Souza; JUSTI, Alyne Nogueira. ALGORITMO PARA DETERMINAÇÃO RÁPIDA DE LIMITES DE SEGURANÇA DE ESTABILIDADE DE TENSÃO PARA SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA. In: **INDUSCON**, 12., 2016, Curitiba.

CHIANG, Hsiao-Dong; ZHAO Jinqun. **Enhanced look-ahead load margin estimation for voltage security assessment**. Power Engineering Society General Meeting, 2003, IEEE. Jul. 2003.

CUTSEM, Thierry Van; VOURNAS Costas. **Voltage Stability of electric power systems**. Springer Science & Business Media, 1998.

FOGAÇA, Luciana R.; JUSTI, Alyne N.; MAZZA, Felipe D. **Análise Estática do Ponto de Colapso de Tensão Através do Método do Fluxo de Potência Continuado**. 2014. 75f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

GARCIA, Paulo Henrique Volpato; PEREIRA, Juliano da Silva; PERRETO, Henrique. **Análise da estabilidade de tensão em sistemas elétricos de potência utilizando o ANAREDE**. 2016. 72f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

GUEDES, R. B. L.; ALBERTO, L. F. C.; BRETAS, N.G. (2001). Determinação de pontos de equilíbrios instáveis para cálculo de estabilidade de tensão através de métodos diretos. **XVI SNPTEE, Simpósio Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**.

KARP, Jessé E.; OLIVEIRA, Lucas M.; SANTOS, Adriana B. **Análise de sistemas elétricos de potência via estimação de estados**. 2013. 122 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

KUNDUR, Prabha; PARSEBA, John; AJJARAPU, Venkat; ANDERSSON, Goran; BOSE, Anjan; CANIZARES, Claudio; HATZIARGYRIOU, Nikos; HILL, David; STANKOVIC, Alex; TAYLOR, Carson; VAN CUTSEM, Thierry; VITTAL, Vijay. **Definition and Classification of Power System Stability**. IEEE Transactions on Power Systems, v. 9, n. 2, mai. 2004.

LOPEZ-LEZAMA, Jesús María; GRANADA-ECHEVERRI, Mauricio; GALLEGOPAREJA, Luis Alfonso. Modelo AC para el despacho combinado de contratos bilaterales y bolsa de energía considerando restricciones de seguridad. **Ing. Univ.**, Bogotá, v. 13, n. 2, p. 227-249, 2009. Disponível em

<http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-21262009000200001&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 31 de maio de 2017.

MARTINS, Luís Fabiano Barone. **Método do look ahead modificado para estudos de colapso de tensão**. 2011. 123 folhas. Disponível em: <http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/87190/martins_lfb_me_bauru.pdf?sequence=1>. Acesso em: 19 de março de 2016.

MONTICELLI, Alcir José. **Fluxo de carga em redes de energia elétrica**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1983.

ONS. ONS apresenta relatório final sobre blecaute de 2009. **Informativo ONS**, ano 1, n. 6, nov. 2009. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/newsletters/informativos/nov2009/06-materia01.html>>. Acesso em 17 de maio de 2016.

RICHA; KUMAR, Sh. Vivek; DHIRAJ, Sh. Kumar. Voltage instability and its prevention using facts controller. **International Journal of Engineering Research and Development**, v. 3, n. 11, p. 06-08, set. 2012. Disponível em: <<http://www.iwar.org.uk/cip/resources/blackout-03/814BlackoutReport.pdf>>. Acesso em 17 de maio de 2016.

SANTOS, Carlisson J.R dos. **Método rápido para avaliação da margem de estabilidade de tensão considerando os limites de potência reativa dos geradores**. 2008. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

SOUZA, A. C. Z. (1996). Determinação de barra crítica e do ponto de colapso pelo vetor tangente. XI CBA, vol. 3, pp. 1393-1398, São Paulo, Setembro.

STAGG, W. Glenn; EL-ABIAD, Ahmed H. **Computer Methods in Power System Analysis**. Internation Student Edition, 1968.

TAYLOR, Carson W. **Power System Voltage Stability**. EPRI Power System Engineering Series. McGraw Hill, 1994.

U.S. – Canada Power System Outage Task Force. **Interim Report: Causes of the August 14th Blackout in the United States and Canada**. 2003. 134 p. Disponível em: <<http://www.iwar.org.uk/cip/resources/blackout-03/814BlackoutReport.pdf>>. Acesso em: 17 de maio de 2016.