Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Índices de Estabilidade de Tensão de um SEE

Nuno Miguel Novais Gonçalves

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
Major Energia

Orientador: Professor Doutor Fernando Pires Maciel Barbosa

Porto, Fevereiro de 2015

U.PORTO
FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA UNIVERSIDADE DO PORTO

MIEEC - MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA ELETROTÉCNICA E DE COMPUTADORES 2014/2015

A Dissertação intitulada

"Índices de Estabilidade de Tensão de um SEE"

foi aprovada em provas realizadas em 12-02-2015

o júri

Presidente Professor Doutor José Rui da Rocha Pinto Ferreira
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Professora Doutora Rita Manuela Monteiro Pereira
Professor Adjunto Departamento de Engenharia Electrotécnica do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Professor Doutor Fernando Pires Maciel Barbosa
Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

O autor declara que a presente dissertação (ou relatório de projeto) é da sua exclusiva autoria e foi escrita sem qualquer apoio externo não explicitamente autorizado. Os resultados, ideias, parágrafos, ou outros extratos tomados de ou inspirados em trabalhos de outros autores, e demais referências bibliográficas usadas, são corretamente citados.

Autor - Nuno Miguel Novais Gonçalves

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

© Nuno Miguel Novais Gonçalves, 2015

Resumo

O objetivo desta dissertação foi analisar a estabilidade de tensão dos Sistemas Elétricos de Energia (SEE), a partir de índices de estabilidade de tensão. Estes índices foram calculados numa rede de teste. Posteriormente foi feita uma análise comparativa entre os diferentes índices de estabilidade de tensão calculados.

Na atualidade, a sociedade é cada vez mais dependente da energia elétrica, verificando-se um aumento progressivo das cargas, colocando os Sistemas Elétricos de Energia a operar cada vez mais perto dos seus limites. Desta forma, é importante utilizar técnicas para analisar a estabilidade do sistema de maneira a garantir a continuidade e a qualidade de serviço aos consumidores de energia elétrica.

A estabilidade de tensão não só é um dos fatores que definem a qualidade de serviço,assim como a falta de estabilidade é uma das causas de *blackouts*. Para analisar a estabilidade de tensão recorre-se aos índices de estabilidade de tensão. Os índices de estabilidade de tensão permitem detetar quando os níveis de tensão estão próximos da instabilidade e tomar medidas corretivas por formar a evitar problemas causados por essas instabilidades.

Na primeira parte desta dissertação são analisadas as técnicas utilizadas para identificar os problemas de estabilidade de tensão num Sistema Elétrico de Energia. Na segunda parte são calculados os índices de estabilidade de tensão de uma rede teste, para diferentes formas de variação da carga, de forma a avaliar o desempenho dos índices.

Palavras-chave: Estabilidade de Tensão, Índices de estabilidade de tensão, Sistemas Elétricos de Energia.

Abstract

The purpose of this dissertation was to study the voltage stability of an Electric Power System, using the voltage stability indices. These indices were calculated to a test system. After that, a comparative analysis between the results of different indices is presented.

Nowadays, society is more dependent of electricity, verifying a progressive increase of loads, putting the Electric Power Systems operating near to the technical limits. So, is important to use techniques to analyze the stability of the system, in order to ensure continuity and quality of the service to the consumers.

The voltage stability is not only one of the factors that define the quality of service, but also one of the causes of blackouts. To analyze the stability are used voltage stability indices. The voltage stability indices allow to detect when the voltage levels are near to instability and take control actions to prevent problems caused by these instability.

In the first part of this dissertation the techniques used to identify the voltage stability problems in Electric Power Systems are analyzed. In the second part are calculated the voltage stability indices in a test system to different kind of load variations, in order to evaluate the performance of different indices.

Keywords: Electric Power Systems , Voltage Stability, Voltage Stability Indices.

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador, Professor Doutor Fernando Maciel Barbosa, o apoio e disponibilidade que sempre teve durante a realização deste trabalho.

Aos meus queridos Pais, pois sem eles não teria esta oportunidade, por todo o apoio, carinho e paciência demonstrada ao longo da minha vida, e pelos jantares de sexta-feira quando chegava à minha querida terra Fafe, que eram as melhores refeições de sempre.

Ao meu irmão, por todo o apoio e pelos conselhos dados, que me foram orientando ao longo destes anos.

A toda a minha família que esteve sempre presente, em especial aos meus primos Sérgio e Ana.

A todos os meus amigos, que contribuíram para a realização desta dissertação e aos que me acompanharam nas longas noites, de estudo, durante o meu percurso académico.

Índice

Resumo ..... **iv**

Abstract ..... **vi**

Agradecimentos ..... **viii**

Índice ..... **x**

Lista de figuras ..... **xii**

Lista de tabelas ..... **xv**

Abreviaturas ..... **xvi**

Capítulo 1 ..... **1**

Introdução 1

1.1 - Objetivo 2

1.2 - Estrutura da dissertação 2

Capítulo 2 ..... **5**

Estabilidade de Tensão 5

2.1 Introdução 5

2.2 Curvas P-V e Curvas V-Q 7

2.3 Análise de Sensibilidade V-Q 22

2.4 Análise Modal Q-V 25

2.5 Índices de Estabilidade de tensão 28

2.5.1 Índice Lmn 29

2.5.2 Índice LQP 32

2.5.3 Índice FVSI 34

2.5.4 Índice LCPI 36

2.6 Conclusão 39

Capítulo 3 ..... **41**

Estudo dos Índices de Estabilidade de Tensão 41

3.1 Rede teste 41
3.2 Variação da potência reativa de carga num barramento 45
3.2.1 Índice Lmn 46
3.2.2 Índice LQP 49
3.2.3 Índice FVSI 53
3.2.4 Índice LCPI 56
3.3 Variação da potência ativa de carga num barramento 60
3.3.1 Índice Lmn 61
3.3.2 Índice LQP 63
3.3.3 Índice FVSI 66
3.3.4 Índice LCPI 68
3.4 Variação da potência reativa de carga no sistema 71
3.4.1 Índice Lmn 72
3.4.2 Índice LQP 74
3.4.3 Índice FVSI 75
3.4.4 Índice LCPI 76
3.5 Conclusão 78

Capítulo 4 81

Conclusões e desenvolvimentos futuros 81
Referências 83
Anexo A 87
Rede teste IEEE 30 barramentos 87
Anexo B 91
Resultados do trânsito de potências (+230%) 91
Anexo C 95
Índices de estabilidade de todas as linhas do sistema 95
Variação da potência reativa apenas num barramento 96
Variação da potência ativa apenas num barramento 102
Variação potência reativa em todas as cargas do sistema 106

Lista de figuras

Figura 2.1 - Curva P-V [10] 8

Figura 2.2 - Sistema de 2 barramentos 9

Figura 2.3 - Curva P-V do sistema da figura 2.2 com E=1,05 e X=0,2 13

Figura 2.4 - Curvas P-V do sistema da figura 2.2 para diferentes valores de reatância de linha 14

Figura 2.5 - Curvas P-V para diferentes fatores de potência da carga [11] 15

Figura 2.6 - Passos iterativos método da continuação [7] 16

Figura 2.7- Fluxograma Método Continuação 20

Figura 2.8 - Curva V-Q [15] 21

Figura 2.9 -Parâmetros linha transmissão 30

Figura 2.10 - Linha de transmissão entre 2 barramentos 32

Figura 2.11 - Modelo em π de um sistema de 2 barramentos [17] 37

Figura 3.1 - Rede teste IEEE de 30 barramentos 42

Figura 3.2- Esquema unifilar da rede IEEE de 30 Barramentos 43

Figura 3.3 - Índices Lmn das linhas da rede IEEE 30 barramentos 43

Figura 3.4 - Índices LQP das linhas da rede IEEE 30 barramentos 44

Figura 3.5 - Índices FVSI das linhas da rede IEEE 30 barramentos 44

Figura 3.6 - Índices LCPI das linhas da rede IEEE 30 barramentos 45

Figura 3.7 - Índice Lmn no barramento 3 46

Figura 3.8 - Índice Lmn no barramento 4 47

Figura 3.9 - Índice Lmn no barramento 5 47

Figura 3.10 - Índice Lmn no barramento 15 48

Figura 3.11 - Índice Lmn no barramento 19 48
Figura 3.12 - Índice Lmn barramento 30 49
Figura 3.13 - Índice LQP no barramento 3 50
Figura 3.14 - Índice LQP no barramento 4 50
Figura 3.15 - Índice LQP no barramento 5 51
Figura 3.16 - Índice LQP no barramento 15 51
Figura 3.17 - Índice LQP no barramento 19 52
Figura 3.18 - Índice LQP no barramento 30 52
Figura 3.19 - Índice FVSI barramento 3 53
Figura 3.20 - Índice FVSI no barramento 4 54
Figura 3.21 - Índice FVSI no barramento 5 54
Figura 3.22 - Índice FVSI no barramento 15 55
Figura 3.23 - Índice FVSI barramento 19 55
Figura 3.24 - Índice FVSI no barramento 30 56
Figura 3.25 - Índice LCPI no barramento 3 57
Figura 3.26 - Índice LCPI no barramento 4 57
Figura 3.27 - Índice LCPI no barramento 5 58
Figura 3.28 - Índice LCPI no barramento 15 58
Figura 3.29 - Índice LCPI no barramento 19 59
Figura 3.30 - Índice LCPI no barramento 30 59
Figura 3.31 - Comparação entre os índices no limite 60
Figura 3.32 - Índice Lmn no barramento 3 61
Figura 3.33 - Índice Lmn no barramento 5 62
Figura 3.34 - Índice Lmn no barramento 15 62
Figura 3.35 - Índice Lmn no barramento 30 63
Figura 3.36 - Índice LQP no barramento 3 64
Figura 3.37 - Índice LQP no barramento 5 64
Figura 3.38 - Índice LQP no barramento 15 65
Figura 3.39 - Índice LQP no barramento 30 65
Figura 3.40 - Índice FVSI no barramento 3 66

Figura 3.41 - Índice FVSI no barramento 5 67
Figura 3.42 - Índice FVSI no barramento 15..... 67
Figura 3.43 - Índice FVSI no barramento 30..... 68
Figura 3.44 - Índice LCPI no barramento 3 69
Figura 3.45 - Índice LCPI no barramento 5 69
Figura 3.46 - Índice LCPI no barramento 15 70
Figura 3.47 - Índice LCPI barramento 30 70
Figura 3.48 - Comparação dos índices no limite 71
Figura 3.49 - Índice Lmn para a potência máxima reativa do sistema 73
Figura 3.50 - Evolução do índice Lmn com o aumento da potência reativa do sistema..... 73
Figura 3.51 - Índice LQP para a potência máxima reativa do sistema 74
Figura 3.52 - Evolução do índice LQP com o aumento da potência reativa do sistema 75
Figura 3.53 - Índice FVSI para a potência máxima reativa do sistema 75
Figura 3.54 - Evolução do índice FVSI com o aumento da potência reativa do sistema..... 76
Figura 3.55 - Índice LCPI para a potência máxima reativa do sistema..... 77
Figura 3.56 - Evolução do índice FVSI com o aumento da potência reativa do sistema..... 77

Lista de tabelas

Tabela 3.1 Incrementos das potências reativas nos barramentos da rede teste IEEE de 30 barramentos 72

Tabela A1 - Características rede IEEE 30 barramentos 88

Tabela A2 - Trânsito de potências caso base 89

Tabela A3 - Trânsito de potências nas linhas caso base 90

Tabela B1 - Trânsito de potências para +230% potência reativa em todas as cargas do sistema 92

Tabela B2 - Trânsito de potências nas linhas para +230% potência reativa em todas as cargas do sistema 93

Tabela C1 - Índices variação potência reativa no barramento 3 96

Tabela C2 - Índices variação potência reativa no barramento 4 97

Tabela C3 - Índices variação potência reativa no barramento 5 98

Tabela C4 - Índices variação potência reativa no barramento 15 99

Tabela C5 - Índices variação potência reativa no barramento 19 100

Tabela C6 - Índices variação potência reativa no barramento 30 101

Tabela C7 - Índices variação potência ativa no barramento 3 102

Tabela C8 - Índices variação potência ativa no barramento 5 103

Tabela C9 - Índices variação potência ativa no barramento 15 104

Tabela C10 - Índices variação potência ativa no barramento 30 105

Tabela C11 - Índices variação potência reativa em todo o sistema 106

Abreviaturas

Lista de abreviaturas (ordenadas por ordem alfabética)

DMS	*Distribution Management System*
FACTS	*Flexible AC Transmission System*
FVSI	*Fast Voltage Stability Index*
IEEE	*Institute of Electrical and Electronic Engineers*
LCPI	*Line Collapse Proximity Index*
SCADA	*Supervisory Control And Data Acquisition*
SEE	Sistema Elétrico de Energia

Capítulo 1

Introdução

O aumento do consumo de energia elétrica e a liberalização do mercado de energia, implica uma otimização da utilização dos recursos energéticos de forma a garantir a eficiência dos Sistemas Elétricos de Energia [17]. O aumento das cargas tem aumentado rapidamente, pelo que os Sistemas Elétricos de Energia têm de evoluir de forma a satisfazerem este crescimento, construindo novas unidades de produção, linhas de transmissão, subestações e novos dispositivos de controlo.

Por vezes as soluções técnicas apresentadas para a evolução do sistema não podem ser realizadas devido a restrições ambientais ou económicas. Assim, o uso mais eficiente do sistema elétrico conduz a situações em que os sistemas ficam a operar mais próximos dos limites de estabilidade de tensão, resultando numa maior probabilidade de ocorrerem colapsos parciais ou totais do sistema [2, 17].

O aumento da possibilidade de problemas relacionados com estabilidade de tensão tem tido especial interesse por parte dos operadores dos Sistemas Elétricos de Energia, pois é necessário, por parte destes, garantir a continuidade de fornecimento de energia e manter a qualidade de serviço.

A estabilidade de tensão define-se como a capacidade de um Sistema Elétrico de Energia manter os níveis de tensão de todos os barramentos dentro dos valores definidos, de acordo com as condições normais de funcionamento, quando é sujeito a uma perturbação [1].

Os problemas resultantes da proximidade à instabilidade de tensão envolvem, em termos operacionais, uma avaliação rápida da robustez do sistema para a configuração do sistema face a um conjunto de contingências pré-definidas. A caraterização da evolução das cargas, mesmo para futuros próximos é cada vez mais difícil devido á complexidade e variabilidade das cargas. A identificação de medidas de controlo corretivo ou preventivo a sugerir aos operadores dos centro de despacho no caso de o sistema estar a operar num estado de alerta ou emergência é cada vez mais um problema de enorme importância para a segurança do sistema [25].

Para determinar a proximidade do sistema a um ponto de instabilidade de tensão é necessário estudar os métodos de análise de estabilidade de tensão, os quais nos permitem determinar a distância ao limite de estabilidade de tensão e, a partir desta informação, tomar medidas que permitam o correto funcionamento do sistema. Os métodos podem ser dinâmicos ou estáticos.

Os índices de estabilidade de tensão são métodos de estáticos de análise da estabilidade de tensão, tendo como base o trânsito de potências do sistema.

1.1 - Objetivo

O objetivo desta dissertação é analisar os índices de estabilidade de tensão de um Sistema Elétrico de Energia (SEE). A análise será completada com o cálculo destes índices numa rede de teste. Posteriormente será feita uma análise comparativa dos diferentes índices de estabilidade de tensão calculados.

Para atingir estes objetivos, utilizando o *PowerWorld*, serão calculados os diferentes índices de estabilidade para a rede de teste de 30 barramentos do IEEE.

1.2 - Estrutura da dissertação

De forma a facilitar a leitura e compreensão, a dissertação é dividida em duas partes e tem a estrutura apresentada de seguida.

Na primeira parte, que corresponde ao Capítulo 2, são apresentados os conceitos e noções fundamentais para facilitar a compreensão sobre a estabilidade de tensão. São apresentados alguns métodos de análise da estabilidade de tensão, como as curvas P-V e curvas Q-V (secção 2.1), Análise de sensibilidade V-Q (secção 2.3), Análise de sensibilidade V-Q (secção 2.3), Análise Modal (secção 2.4) e os Índices de Estabilidade de Tensão (secção 2.5).

Na segunda parte, que corresponde ao Capítulo 3, são apresentados os resultados para os índices de estabilidade de tensão apresentados no capítulo 2 para diferentes variações de carga na rede IEEE de 30 barramentos. Na secção 3.1 são apresentados os resultados dos índices de estabilidade de tensão para o caso base e as características da rede teste, na secção 3.2 são apresentados os índices de estabilidade de tensão quando se varia a potência reativa num barramento, na secção 3.3 são apresentados os índices de estabilidade de tensão quando se varia a potência ativa num barramento e na secção 3.4 são apresentados os índices de estabilidade de tensão quando se varia a potência reativa em todas as cargas do sistema.

O Capítulo 4 são as conclusões e perspetivas de trabalhos futuros.

A dissertação é completada com as Referências e 3 Anexos.

O Anexo A apresenta as características da rede teste IEEE 30 barramentos e o trânsito de potências para o caso base. O Anexo B o trânsito de potências para o estudo da variação da potência reativa de todos os barramentos do sistema para o máximo carregamento do sistema (+230%). E o Anexo C valores índices de estabilidade de todas as linhas do sistema para o carregamento máximo do sistema, dos três estudos efetuados.

Capítulo 2

Estabilidade de Tensão

2.1 Introdução

A estabilidade de tensão define-se como a capacidade de um Sistema Elétrico de Energia (SEE) manter os níveis de tensão de todos os barramentos dentro dos valores definidos, de acordo com as condições normais de funcionamento, quando é sujeito a uma perturbação [1].

A instabilidade de tensão de um sistema deve-se principalmente às variações bruscas da potência consumida pelas cargas, o que provoca variações nos níveis de tensão e ao nível de potência reativa existente no sistema.

Quando ocorre um aumento do consumo de energia reativa as reservas de produção de energia reativa existentes devem compensar com o aumento da produção de energia reativa. O aumento de produção de energia reativa permite melhorar os níveis de tensão das redes de transporte, uma vez que devido à distância entre as unidades produtoras e as unidades de consumo, verificam-se maiores quedas de tensão nas linhas [3].

Quando em pelo menos um dos barramentos se verifica uma diminuição progressiva e incontrolável da tensão devido a uma perturbação, com origem no aumento da carga ou por alguma alteração das condições do sistema, o sistema é considerado instável. A instabilidade de tensão é um acontecimento local contudo, as consequências resultantes podem-se alastrar a outros pontos do sistema [1].

A consequência mais séria que pode surgir devido à instabilidade de tensão é o colapso de tensão do sistema, que pode originar os conhecidos "apagões" [4]. O colapso de tensão é um fenómeno dinâmico, que normalmente ocorre nos períodos de ponta do consumo de energia. Nestes períodos, o aumento contínuo de carga leva a um aumento das correntes nas linhas de transmissão e, consequentemente, a uma diminuição dos níveis de tensão e ao aumento das perdas.

Para recuperar de um colapso de tensão são necessários longos restauros do sistema, para o sistema voltar às condições normais de funcionamento, enquanto os consumidores podem

ficar sem abastecimento durante longos períodos. Uma forma de se detetar se um sistema está próximo do colapso de tensão, é a análise da rápida redução dos níveis de tensão nos barramentos do sistema, que pode por em causa a segurança do SEE, o valor da tensão em si, não é tão importante quanto isso [4].

Diversos apagões relacionados com instabilidade de tensão, foram registados. Colocam em causa a segurança do SEE e todos implicaram custos avultados.

Os mais recentes apagões relacionados com a instabilidade de tensão nos últimos anos são os seguintes [2]:

- Grécia em Julho de 2004;
- Rússia em Maio de 2005;
- Alemanha em Novembro de 2006;
- Islândia, em Setembro de 2010;
- Nordeste Brasileiro, em Fevereiro de 2011;
- Chile em Setembro de 2011;
- Turquia, em Janeiro de 2012;
- Índia, em Julho 2012;
- Bangladesh em Novembro de 2014;

Os problemas de estabilidade de tensão geralmente ocorrem em sistemas que estão em condições de funcionamento perto do seu limite. Embora a perturbação que leva ao colapso de tensão possa ter origem em várias causas, a principal causa deve-se a um subdimensionamento dos SEE [1].

De entre as principais causas relacionadas com o início dos problemas de estabilidade de tensão, referem-se as seguintes [5,6]:

- Consumo elevado de potência reativa;
- Distâncias elevadas entre as centrais produtoras de energia elétrica e as cargas, o que implica redes de transporte muito extensas;
- Capacidade das linhas de transmissão, menor que a potência requerida pelas cargas;
- Localização de dispositivos de controlo de tensão desajustada, que têm como finalidade injetar potência reativa, para aumentar os níveis de tensão;
- Má coordenação entre os vários elementos de controlo;
- Alterações na topologia da rede, como por exemplo saída de uma linha de transmissão de serviço, o que pode provocar uma sobrecarga nas linhas adjacentes;
- Transformadores com regulação em carga, que fazem a ligação entre a rede de transporte e a rede de distribuição, utilizados para manter os níveis de tensão dentro dos limites na distribuição, porém quando mudam as tomadas dos

transformadores, a potência fornecida pelos geradores aumenta, o que provoca um aumento das perdas nas linhas.

Para determinar a proximidade de um sistema a um ponto de instabilidade de tensão é necessário estudar os métodos de análise de estabilidade de tensão, os quais nos permitem determinar a distância ao limite de estabilidade de tensão e, a partir desta informação, tomar medidas que permitam o correto funcionamento do sistema.

A análise dinâmica e estática são as duas maneiras mais eficazes de abordar os problemas de estabilidade de tensão. A análise dinâmica, é mais útil no sentido de fornecer uma melhor compreensão da origem de um colapso de tensão sendo possível coordenar as operações entre aparelhos de controlo e proteção, e tomar algumas das medidas corretivas, enquanto a análise estática permite um conhecimento sobre a origem da instabilidade de tensão e determinar os fatores que para ela contribuem [2].

O método da análise estática consiste em retirar consecutivas "fotografias" das condições do sistema ao longo do tempo e ir analisando cada uma delas. Assim sendo, as derivadas em relação ao tempo de cada "fotografia" são anuladas, e as equações que definem o sistema são reduzidas a um conjunto de equações algébricas [1].

A instabilidade de tensão no SEE é um fenómeno dinâmico, mas a abordagem do problema a partir da análise estática é normalmente usada, uma vez que a instabilidade de tensão é vista como um problema estacionário, o que é ideal para este tipo de análise. A análise estática é frequentemente utilizada na investigação e em aplicações de monotorização em tempo real, permitindo uma rápida e segura abordagem do problema de instabilidade de tensão.

Alguns métodos mais utilizados para a análise estática são o trânsito de potências, a partir da Matriz Jacobiana, as curvas P-V e Q-V, entre outros. Estes métodos permitem o cálculo de índices de estabilidade de tensão.

Estes métodos e os índices de instabilidade de tensão têm como objetivo permitir uma monotorização mais rápida e eficaz para encurtar o tempo de intervenção quando um SEE se encontra com problemas de estabilidade de tensão, evitando assim que se atinjam consequências mais graves no sistema e nos seus utilizadores.

2.2 Curvas P-V e Curvas V-Q

As curvas P-V são um dos métodos mais utilizados para prever situações de instabilidade de tensão. São utilizadas para determinar a margem de estabilidade existente num sistema, ou seja, a carga do sistema vai sendo aumentada gradualmente, e iniciando-se o estudo no caso base, são feitos incrementos sucessivos da carga. Em cada incremento é recalculado o novo trânsito de potências para calcular o novo ponto de funcionamento do sistema. São feitos

incrementos da carga, até que seja atingido o ponto crítico da curva. Ao longo do incremento de carga, os níveis de tensão são observados e assim vão-se construindo as curvas P-V, nomeadamente para os barramentos mais críticos do sistema [8,9].

Estas curvas permitem analisar a relação entre a tensão e a potência ativa consumida num determinado barramento do sistema. O incremento das cargas pode ser feito em todo o sistema ou então podem ser feitos em determinadas zonas do sistema [7]. Para se obterem os valores dos trânsitos de potências, recorre-se a um *software* de simulação.

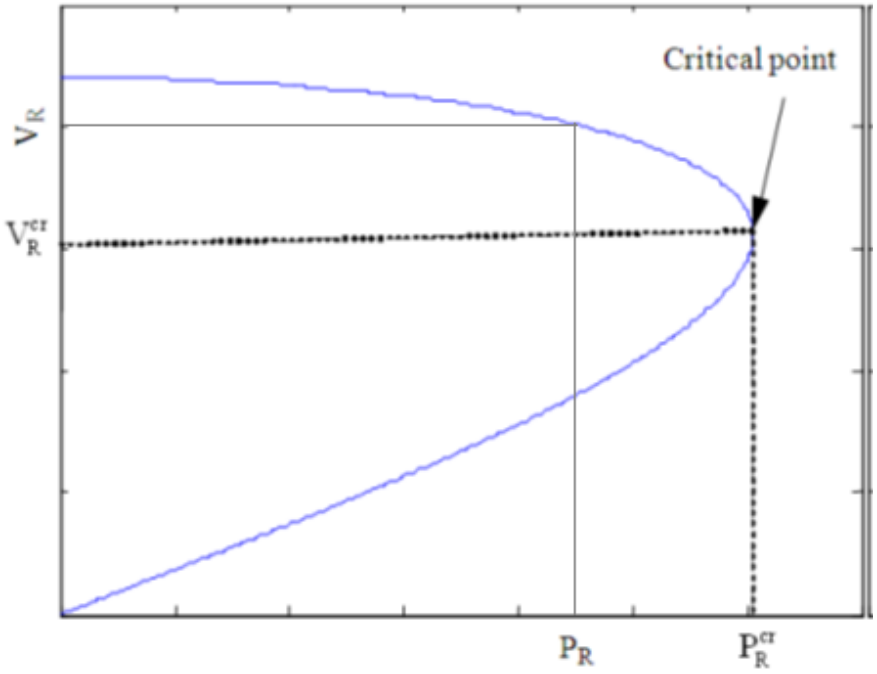


Figura 2.1 - Curva P-V [10]

O ponto crítico representado na figura 2.1, corresponde ao ponto máximo de potência ativa que o sistema consegue suportar, quer a nível do subsistema de produção quer a nível do subsistema de transmissão. A este ponto corresponde um valor de tensão que se designa por tensão crítica.

A distância do ponto de funcionamento do sistema, ao ponto crítico, determina a margem de estabilidade que o sistema ainda possui, permitindo analisar o aumento de carga que o sistema ainda admite sem perder a estabilidade. Na região da curva P-V próxima do ponto crítico, a variação da tensão é muito mais acentuada quando ocorre uma variação da carga. Assim sendo, quando o sistema se encontra na vizinhança do ponto crítico de funcionamento, o sistema torna-se mais sensível em relação às pequenas variações de carga [9].

A partir da imagem da figura 2.1 é possível observar que para cada ponto de funcionamento de potência inferior à do ponto crítico, existem sempre dois pontos de funcionamento do

sistema, um na parte superior da curva representada por V_R e outro da parte inferior da curva. A parte superior corresponde a níveis de tensão estáveis, enquanto a parte inferior da curva corresponde a tensões mais baixas o que implica correntes mais elevadas para garantir o valor de potência. Assim sendo, apenas a parte superior da curva garante a estabilidade de tensão, dependendo dos limites considerados para o sistema.

No ponto crítico da curva apenas existe um valor de tensão, para a potência desse ponto. Se a carga aumentar para além deste ponto o sistema deixa de ser capaz de fornecer potência reativa e ocorre o colapso de tensão do sistema.

No limite de carga do sistema, ou seja no ponto crítico do sistema, a matriz Jacobiana que representa as equações do trânsito de potência do sistema é singular, e o declive da curva nesse ponto torna-se infinito [7]. Devido à singularidade da matriz Jacobiana nesse ponto, o método mais utilizado para o cálculo do trânsito de potências, o método de Newton-Raphson, apresenta problemas de convergência.

Para melhor se analisar a estabilidade do sistema, deve-se aumentar a carga em todos os barramentos do sistema, repartindo a produção por todos os geradores do sistema.

Para explicar melhor as curvas P-V vamos considerar o sistema com 2 barramentos, com apenas um gerador, uma linha de transmissão e uma carga como se pode ver na figura 2.2.

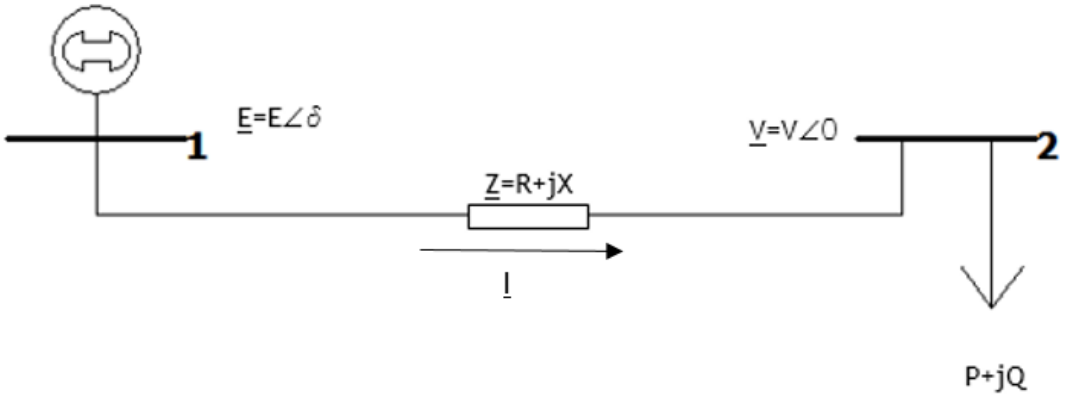


Figura 2.2 - Sistema de 2 barramentos

A corrente que passa na linha entre os dois barramentos é calculada a partir da seguinte expressão:

$$\underline{I} = \frac{\underline{E} - \underline{V}}{\underline{Z}} \tag{2.1}$$

sendo,

$$\underline{S} = P + jQ = \underline{VI^*} \tag{2.2}$$

Substituindo a equação 2.1 na equação 2.2,

$$\underline{S} = V\left(\frac{\underline{E} - \underline{V}}{\underline{Z}}\right)^* = V\left(\frac{Ee^{j\delta} - V}{R + jX}\right)^* =$$

$$= V\left(\frac{E\,(cos\delta - jsen\delta) - V}{R - jX}\right)^* =$$

$$= \frac{EV\,(cos\delta + jsen\delta) - V^2}{R + jX} \tag{2.3}$$

A partir da equação 2.3 é possível obter expressões para a potência ativa e para a potência reativa consumida pela carga

$$P = \frac{-RV^2 + VE(Rcos\delta + Xsen\delta)}{R^2 + X^2} \tag{2.4}$$

$$Q = \frac{-XV^2 + VE(Xcos\delta - Rsen\delta)}{R^2 + X^2} \tag{2.5}$$

Elevando as equações 2.4 e 2.5 ao quadrado,

$$[P(R^2 + X^2) + RV^2]^2 = [VERcos\delta + VEXsen\delta]^2 \tag{2.6}$$

$$[Q(R^2 + X^2) + XV^2]^2 = [VEXcos\delta - VERsen\delta]^2 \tag{2.7}$$

Somando as equações 2.6 e 2.7 obtém-se:

$$(P^2 + Q^2)(R^2 + X^2) + V^4 - (VE)^2 + 2PRV^2 + 2QXV^2 = 0 \tag{2.8}$$

Alterando o aspeto da equação 2.8,

$$V^4 + [2(RP + XQ) - E^2]V^2 + (P^2 + Q^2)(R^2 + X^2) = 0 \tag{2.9}$$

É possível representar a equação 2.9 através da seguinte expressão simplificada:

$$V^4 + bV^2 + c = 0 \tag{2.10}$$

O descriminante da equação 2.10 é o seguinte:

$$\Delta = b^2 - 4c \tag{2.11}$$

e

$$X_A = \frac{-b + \sqrt{\Delta}}{2} \tag{2.12}$$

$$X_B = \frac{-b - \sqrt{\Delta}}{2} \tag{2.13}$$

Assim sendo, a solução da equação é:

$$V = \left\{ \pm\sqrt{X_A}, \pm\sqrt{X_B} \right\} \tag{2.14}$$

As soluções de interesse são apenas as soluções positivas. Assim sendo, obtêm-se duas soluções $\left(+\sqrt{X_A}, +\sqrt{X_B}\right)$ para o módulo da tensão do barramento 2.

$$V = \sqrt{\frac{E^2}{2} - RP - XQ \pm \sqrt{\frac{E^4}{4} - E^2(RP + XQ) - (XP - RQ)^2}} \tag{2.15}$$

Da equação anterior é possível retirar as equações das duas curvas que formam a curva P-V.

$$V_A = \sqrt{\frac{E^2}{2} - RP - XQ + \sqrt{\frac{E^4}{4} - E^2(RP + XQ) - (XP - RQ)^2}} \tag{2.16}$$

$$V_B = \sqrt{\frac{E^2}{2} - RP - XQ - \sqrt{\frac{E^4}{4} - E^2(RP + XQ) - (XP - RQ)^2}} \tag{2.17}$$

V_A são os valores da parte superior da curva P-V, e V_B são os valores da parte inferior da curva P-V. Assim, para cada incremento de carga, são obtidos dois valores da curva P-V. O valor mais elevado corresponde ao valor de tensão estável. Quando ambas as equações possuem o mesmo valor para a mesma potência consumida pela carga, é sinal que se atingiu o ponto crítico da curva P-V [9].

Como é possível verificar a tensão no barramento 2 é influenciada pela potência consumida pela carga, pela reactância da linha e pelo fator de potência da carga [9].

Para simplificar o cálculo da curva P-V, a resistência da linha de transmissão da figura 2.2 pode ser desprezada. Assim sendo, o módulo da tensão é dado pela fórmula seguinte:

$$V = \sqrt{\frac{E^2}{2} - XQ \pm \sqrt{\frac{E^4}{4} - E^2XQ - (XP)^2}} \tag{2.18}$$

Outra simplificação possível, é considerar que a carga só consome energia ativa, ou seja, possui fator de potência unitário. Com esta simplificação, as equações para as curvas têm as seguintes expressões:

$$V_A = \sqrt{\frac{E^2}{2} + \sqrt{\frac{E^4}{4} - (XP)^2}} \tag{2.19}$$

$$V_B = \sqrt{\frac{E^2}{2} - \sqrt{\frac{E^4}{4} - (XP)^2}} \tag{2.20}$$

A partir das expressões 2.19 e 2.20 é possível verificar que quando não há carga no barrento 2 os valores para as tensões são os V_A=E e V_B=0 respetivamente.

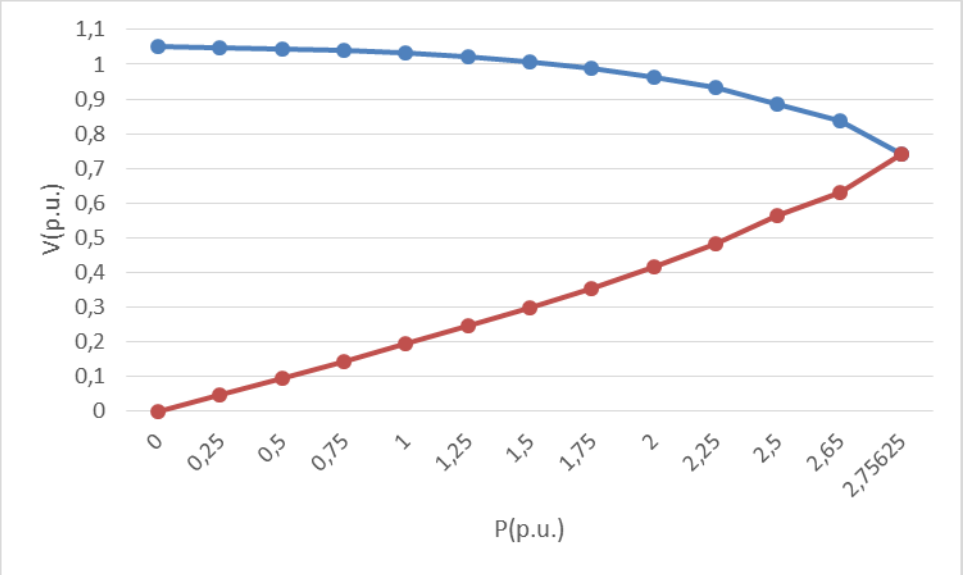


Figura 2.3 - Curva P-V do sistema da figura 2.2 com E=1,05 e X=0,2

A figura 2.3 foi obtida através da ferramenta de cálculo Excel, considerando a tensão E igual a 1.05 e X= 0.2.

A partir da análise da figura 2.3 verifica-se que para uma tensão de 1.05 p.u. no barramento 1, a potência máxima que é possível transferir é de 2.756 p.u., que corresponde ao ponto crítico. Se a carga do sistema ultrapassar este limite o sistema torna-se instável e verificou-se o colapso de tensão.

Como é possível verificar a partir da expressão 2.15 o valor da impedância da linha tem influência na estabilidade de tensão. Na figura 2.4 é possível verificar como a impedância das linhas de tensão influencia os valores de tensão e da capacidade de transferência de potência do sistema. Tal como na figura 2.3 o fator de potência foi considerado unitário e o valor da resistência da linha desprezado.

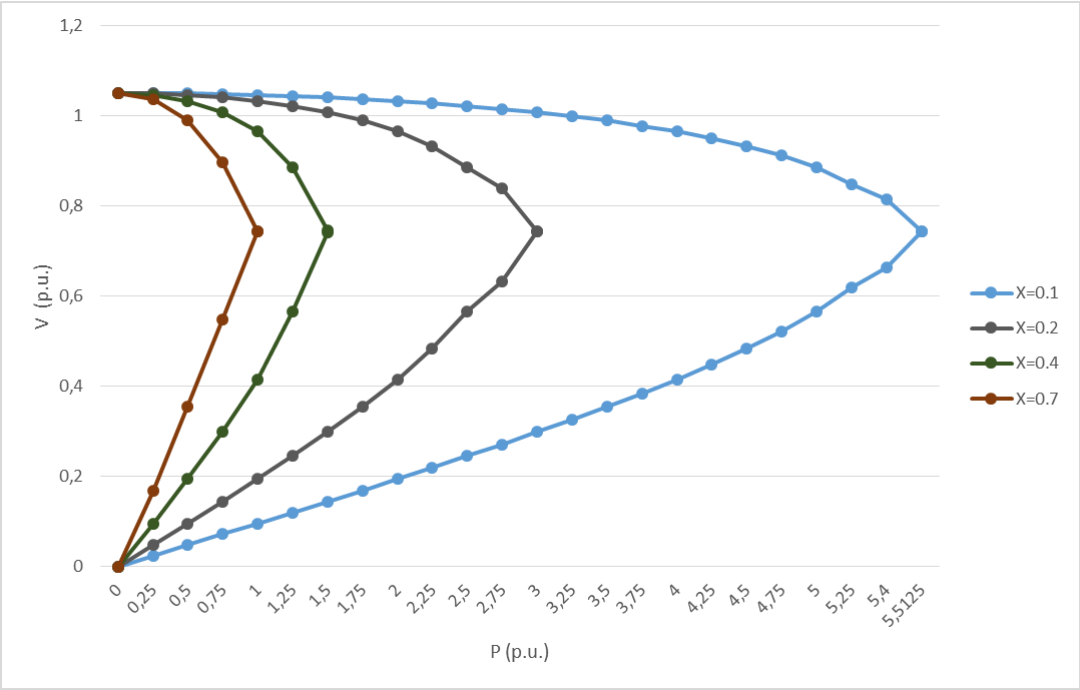


Figura 2.4 - Curvas P-V do sistema da figura 2.2 para diferentes valores de reatância de linha

A figura 2.4 foi obtida através da ferramenta de cálculo Excel, considerando a tensão E igual a 1.05.

Da figura 2.4 é possível verificar que para diferentes valores de reactância de linha, o valor do ponto crítico da curva P-V vai-se alterando, sendo que, quanto maior o valor de reactância da linha, menor será a capacidade de transferência de energia do sistema em questão. Como foi referido anteriormente, quanto maior a distância das linhas de transmissão entre a produção e o consumo, maior serão as reactâncias das linhas.

Com uma tensão no barramento 1 de 1,05 p.u. o valor do ponto crítico é independente do valor da reactância da linha. O valor do fator de potência da carga manteve-se unitário.

Na figura 2.5 é possível analisar as alterações que o fator de potência provocam na estabilidade de tensão. Na figura 2.5 a reactância da linha de transmissão mantem-se constante para os diferentes fatores de potência de carga e o valor da resistência é desprezável.

Quanto menores os valores da tg Φ , mais o valor de potência que o sistema é capaz de transmitir aumenta, porém o valor da tensão também aumenta. Esta situação pode trazer problemas, uma vez que para valores pertos do ponto crítico, os valores de tensão encontram-se dentro dos limites normais de operação do sistema [11].

No caso de valores de tg Φ <0, na parte superior da curva P-V, a tensão aumenta com o aumento da potência consumida pela carga, o que se deve ao facto de quando o valor de tg Φ for negativo, quanto maior for a potência ativa consumida, mais energia reativa é produzida pela carga [11].

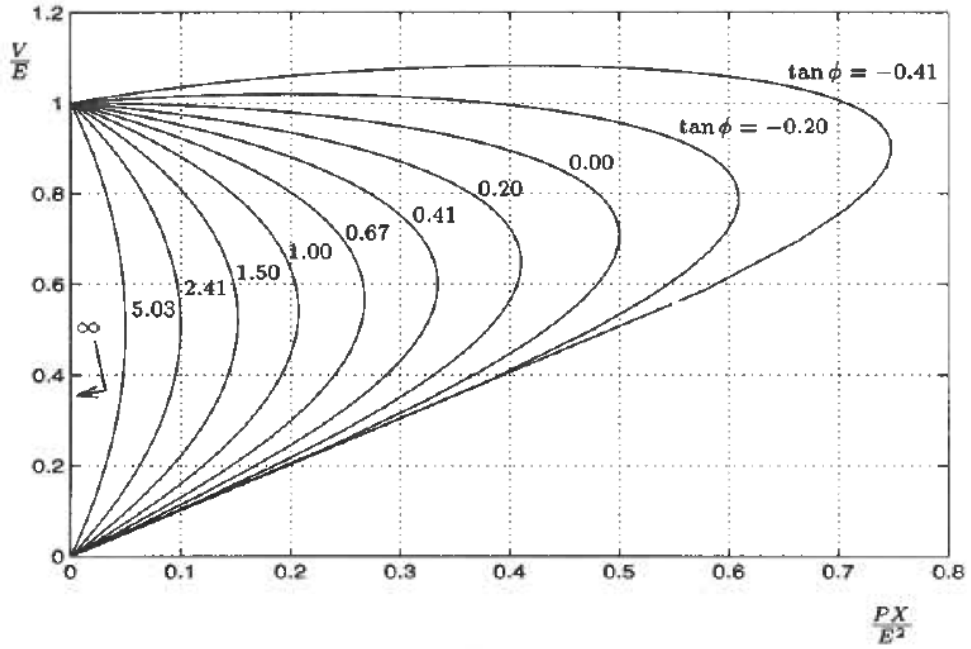


Figura 2.5 - Curvas P-V para diferentes fatores de potência da carga [11]

O incremento do fator de potência permite fornecer mais potência para a carga enquanto para fatores de potência menores, em que as cargas consomem mais energia reativa, o ponto crítico do sistema diminui [10].

Os resultados apresentados até agora correspondem a um sistema simples de apenas 2 barramentos e uma linha de transmissão. Para sistemas de maiores dimensões, sistemas multimodais, os pontos das curvas P-V são obtidos a partir de sucessivos estudos de trânsito de potências. O trânsito de potências é calculado a partir de programas de simulação baseados geralmente no algoritmo de Newton-Raphson. Existe um problema neste algoritmo, uma vez que apresenta problemas de convergência perto do limite de estabilidade [1].

Uma solução para resolver o problema da convergência dos métodos utilizados no trânsito de potência é o uso do método de continuação.

O método da continuação consiste em reformular as equações do trânsito de potência para que em todas as condições de carga, seja possível obter uma solução, quer para os pontos de estabilidade quer para os pontos de instabilidade, ou seja, permite obter a parte superior e a parte inferior da curva P-V [1].

Este método consiste em encontrar uma continuidade de soluções do trânsito de potências para condições de mudança de carga. O objetivo é traçar as curvas P-V dos barramentos do sistema a partir de uma solução inicial até ao ponto crítico [12]. Este método usa um processo iterativo baseado em passos de previsão e correção. Como mostrado na figura 2.6.

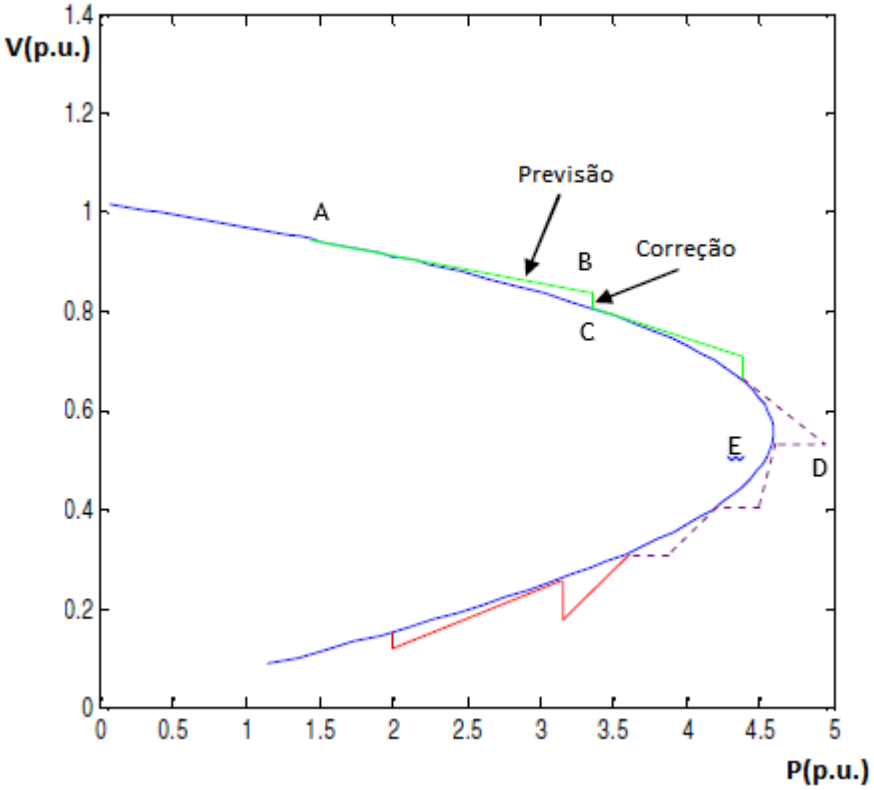


Figura 2.6 - Passos iterativos método da continuação [7]

A partir da solução inicial do trânsito de potências (A), é calculado um passo de previsão tangente, para estimar a solução (B), para um determinado aumento de carga. O passo de correção determina a solução exata (C) a partir de um método de análise de trânsito de potências assumindo que o valor da carga se mantem fixo. Os valores de tensão são previstos através do passo de previsão tangente à solução exata e corrigidos através de um novo passo de correção, até que o novo valor da potência estimada ultrapasse o limite máximo da solução exata (D). O passo de correção a partir deste ponto não pode ser calculado assumindo que a potência da carga é fixa, uma vez que a correção seria uma linha vertical sem nunca encontrar a solução exata, o que faria com que o método não convergisse. Para resolver este problema o passo de correção deve assumir agora que o valor da tensão no barramento é fixa para achar a nova solução (E), o que fará com que o passo de correção seja uma linha horizontal, que irá coincidir com a solução exata. Quando o limite de estabilidade de tensão é atingido, para determinar o valor exato do máximo da carga, o aumento da carga deve ser reduzido gradualmente ao longo dos passos de previsão [1].

A partir de uma formulação matemática, o método da continuação permite formular é um processo iterativo em que as equações utilizadas são idênticas às utilizadas no método de Newton-Raphson, mas utilizam mais uma variável, referente aos aumentos de carga [1].

Esta reformulação, com a capacidade de aumentar a produção assim como a potência consumida pelas cargas pode ser expressa como:

$$F(\theta, V) = \lambda K \tag{2.21}$$

onde,

λ é o fator de carregamento (nova variável)

θ é o vetor dos ângulos de tensão nos barramentos

V é o vetor dos módulos de tensões nos barramentos

K é o vetor que representa a percentagem de alteração das cargas em cada barramento

O valor de λ deve se encontrar entre $0 \leq \lambda \leq \lambda_{PCr}$, onde λ_{PCr} corresponde ao ponto critico do sistema. A equação 2.21 pode ser expressa como:

$$F(\theta, V, \lambda) = 0 \tag{2.22}$$

Como o método da continuação é uma reformulação do método de Newton-Raphson, o sistema de equações (2.22) a resolver, terá duas equações por cada barramento PQ e uma por cada barramento PV, assim a dimensão do sistema será $2n_{PQ} + n_{PV}$.

O passo de previsão é uma aproximação linear, para encontrar uma estimativa da solução seguinte quando ocorre uma alteração numa das variáveis θ, V, λ. Para calcular essa estimativa é necessário calcular o vetor tangente à solução inicial, para o que é necessário derivar ambos os membros da equação 2.22, obtendo-se a seguinte expressão:

$$d[F(\theta, V, \lambda)] = F_\theta d_\theta + F_V d_V + F_\lambda d_\lambda = 0 \tag{2.23}$$

ou numa forma matricial,

$$[F_\theta \quad F_V \quad F_\lambda] \cdot \begin{bmatrix} d\theta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} = 0 \tag{2.24}$$

Onde a matriz do lado esquerdo é composta pelo Jacobiano do trânsito de potências e pela coluna F_λ, corresponde à nova variável λ. O vetor da direita corresponde ao vetor tangente.

Após a introdução da nova variável, o número de variáveis era superior ao número de equações, logo o sistema de equações era indeterminado. Para a solução do conjunto de equações ser possível após introdução da variável λ nas equações do trânsito de potências, é necessário mais uma equação no sistema de equações. Essa equação deve definir que um dos componentes do vetor tangente seja +1 ou-1. Este componente tem o nome de parâmetro de continuação (e_k).

Com a introdução da nova equação, a expressão 2.24, ganha o seguinte especto:

$$\begin{bmatrix} F_\theta & F_V & F_\lambda \\ & e_k & \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} d\theta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix} \tag{2.25}$$

O vetor e_k é um vetor linha com os elementos nulos exceto o k-ésimo elemento, que corresponde ao parâmetro de continuação.

Com a escolha correta do índice K, a matriz do lado direito da expressão 2.25 não será singular no ponto de colapso de tensão, permitindo assim uma convergência do método de continuação nas proximidades desse ponto. O valor do k-ésimo elemento do vetor e_k é +1 se a K-ésima variável estiver a aumentar e -1 se estiver a diminuir.

Inicialmente deve – se escolher o parâmetro λ como parâmetro de continuação e deve ter o valor +1.

Depois de se encontrar o valor tangente, a previsão para a solução seguinte é dada por:

$$\begin{bmatrix} \theta \\ V \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_0 \\ V_0 \\ \lambda_0 \end{bmatrix} + \sigma \begin{bmatrix} d\theta \\ d\lambda \\ dV \end{bmatrix} \tag{2.26}$$

O valor σ é um valor escalar que define a dimensão do passo de previsão. Se para um dado passo não for possível encontrar uma solução no passo de correção, o valor do passo deve ser reduzido e o passo de correção deve ser repetido até alcançar uma solução satisfatória, ou seja, dentro do raio de convergência do passo corretor.

Depois da solução prevista é necessário corrigir a solução para um valor exato. No passo corretor ao conjunto inicial de equações é adicionada uma equação que especifica o valor da variável de estado escolhida como parâmero de continuação. Com isto, o novo conjunto sistema de equações é o seguinte:

$$\begin{bmatrix} F(\theta, V, \lambda) = 0 \\ x_k - \eta \end{bmatrix} = 0 \tag{2.27}$$

Na equação 2.27 a variável de estado x_k corresponde ao parâmetro de continuação e η corresponde ao valor previsto para o valor de x_k. Este sistema de equações pode ser resolvido através de umas alterações do método de Newton-Raphson.

A introdução da equação adicional, x_k – η torna o Jacobiano não-singular no ponto crítico e assim o método da continuação pode ser aplicado depois de atingido o ponto crítico permitindo calcular a parte inferior da curva P-V. A componente do vetor tangente da variável λ é positiva para a parte superior da curva P-V, é nula no ponto crítico e é negativa na parte inferior da curva. O sinal da tangente de λ indica se o ponto crítico foi atingido ou ainda não.

Se o fator de continuação continuar a ser a carga (λ), o passo corretor será uma linha vertical no plano V-P (B-C Figura 2.6). Por outro lado, se o fator corretor for o valor da tensão (V), o passo corretor será uma linha horizontal (D-E Figura 2.6).

Uma seleção adequado do parâmetro de continuação, é muito importante para o passo corretor. Uma má escolha pode tornar o método divergente. Como foi referido se o parâmetro de correção for a carga, a linha traçada é vertical em relação ao plano P-V. Se o ponto crítico já tiver sido ultrapassado e se mantiver a carga como parâmetro de correção, o método vai divergir. Quando se parte do caso base, a melhor escolha para o parâmetro de continuação, é o parâmetro λ, uma vez que as restantes variáveis mantêm-se aproximadamente constante.

Para ver qual o melhor parâmetro de continuação, deve-se verificar qual das variáveis possui maior valor, em módulo do vetor tangente, ou seja, deve ser a variável com maior taxa de variação perto da solução calculada.

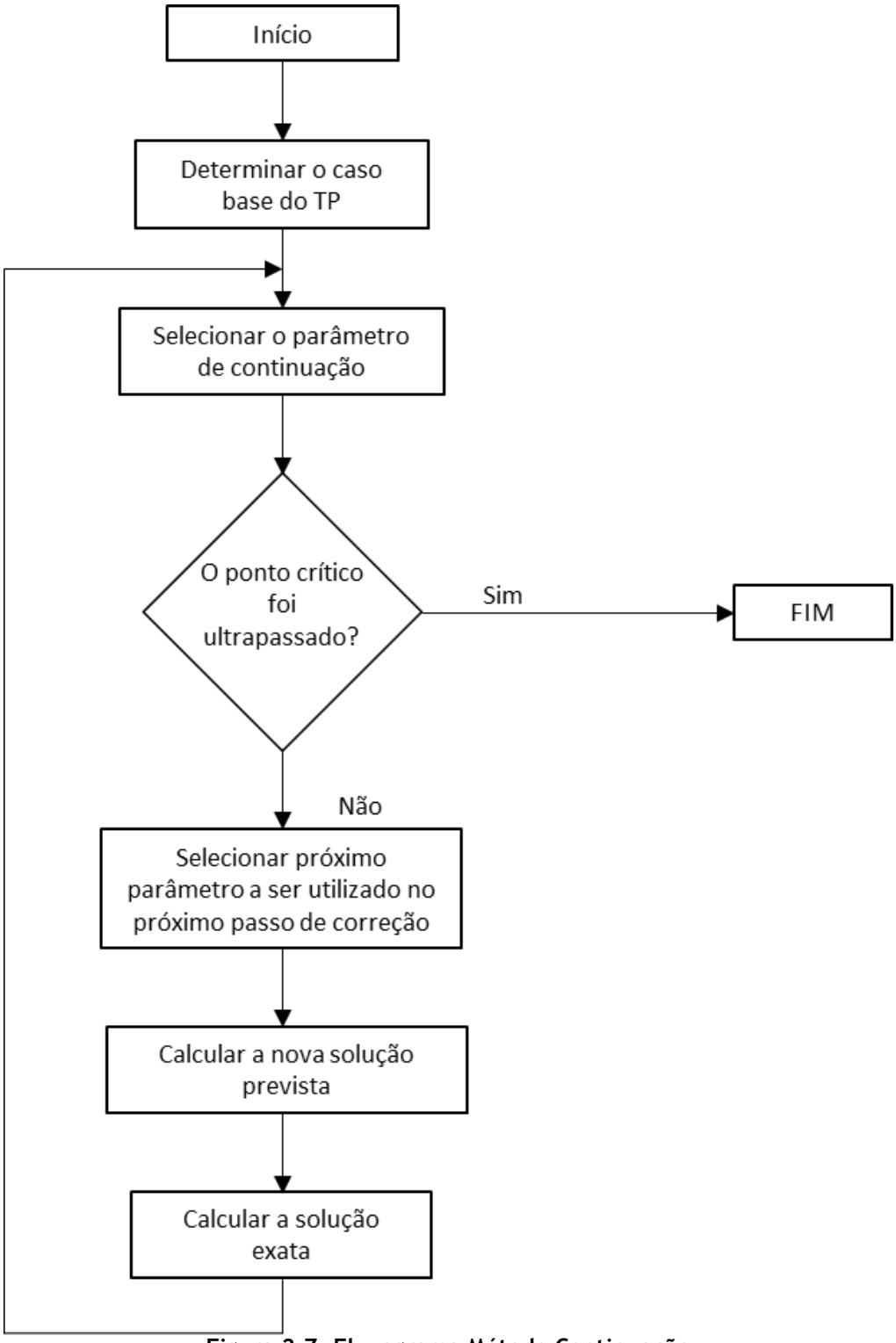


Figura 2.7- Fluxograma Método Continuação

O método da continuação é robusto e flexível, é ideal para a resolução de problema de trânsito de potências com dificuldades de convergência no ponto de colapso. É, contudo, um método que exige elevados tempos computacionais.

A melhor forma de evitar o tempo necessário por parte do método de continuação, é utilizar os métodos de cálculo de trânsito de potências convencionais, até ao ponto em que convergem e, a partir da última solução obtida por esses métodos, passar a utilizar o método da continuação, para obter as soluções próximas do limite de estabilidade de tensão [1].

As curvas P-V são um método eficaz quando se pretende analisar a estabilidade de tensão em relação à Potência ativa. Outra forma de análise da estabilidade de tensão são as curvas V-Q. As curvas V-Q, tal como nas curvas P-V, são obtidas a partir de sucessivos estudos de cálculo de trânsito de potência de um dado sistema. A análise da estabilidade de tensão, a partir de curvas V-Q, surgiu devido à dificuldade em convergir que os métodos de cálculo de trânsito de potências apresentavam, perto do máximo de transferência de potência suportada por um ramo do sistema [14].

Uma curva V-Q expressa a relação entre o trânsito de potência reativa e a tensão dos barramentos do sistema. Estas curvas podem ser determinadas ligando um gerador fictício com potencia ativa igual a zero num barramento, e ir registando a potência reativa produzida, ao longo das variações da tensão. Como a tensão é utilizada como variável independente nestas curvas, é usual usar a tensão no eixo das abcissas, obtendo-se assim as curvas V-Q, o que não se verificava anteriormente nas curvas P-V. As curvas V-Q fornecem informação para determinar a potência reativa necessária no sistema, para colocar o sistema em condições de operações normais após uma perturbação ou para obter níveis de tensão desejados [11, 14].

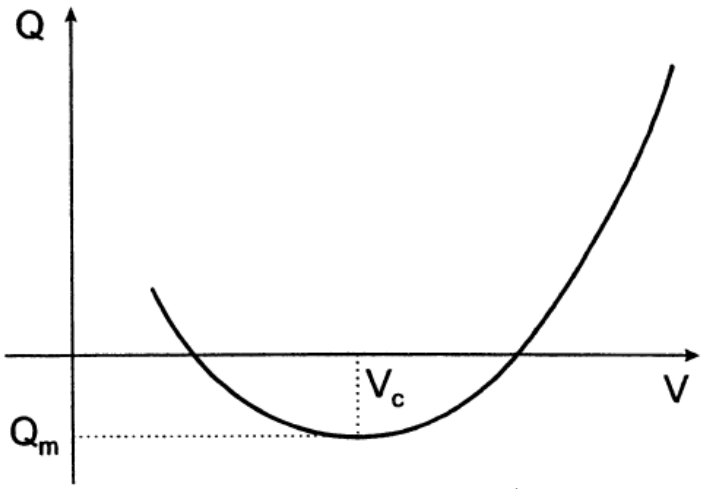


Figura 2.8 - Curva V-Q [15]

Na figura 2.8, como o mínimo da curva V-Q se encontra abaixo do eixo de tensão, conclui-se que o sistema está a operar abaixo da capacidade máxima, e o sistema não precisa de compensação de energia reativa. Os valores com derivada positiva da curva V-Q indicam condições estáveis de funcionamento, enquanto os valores com derivada negativa indicam condições de instabilidade. O funcionamento em condições estáveis da curva V-Q corresponde à interseção com o eixo V com maior valor (ponto de intersecção mais à direita).

Se a curva V-Q se encontrar acima do eixo V, ou seja o mínimo da curva for positivo, o sistema necessita de injeção de potência reativa de forma a garantir a estabilidade. Assim sendo, a diferença entre o mínimo da curva e o eixo das abcissas corresponde à margem de potência reativa que as cargas do sistema podem aumentar, no caso de o mínimo da curva ser negativo, e corresponde à potência reativa mínima necessária a injetar para garantir o funcionamento do sistema [11].

As curvas P-V e V-Q são obtidas a partir de sucessivos trânsitos de potências, o que torna o seu cálculo computacional muito demorado e não fornecem informação rapidamente em situações em que se verificam problemas de estabilidade. Estes dois métodos de análise de estabilidade de tensão, focam-se em barramentos individuais, o que torna difícil identificar as áreas críticas em sistemas de grandes dimensões. Para uma análise de estabilidade de tensão a partir destas curvas, os barramentos escolhidos para análise devem ser escolhidos com algum cuidado, para diminuir o número de curvas necessárias.

Uma solução face aos problemas apresentados pelas curvas P-V e V-Q, é a análise de sensibilidade V-Q, e a análise modal. Estes métodos fornecem informação sobre a estabilidade de tensão de todo o sistema e permitem identificar as áreas mais problemáticas do sistema.

2.3 Análise de Sensibilidade V-Q

Este método baseia-se no método de Newton-Raphson utilizado para determinar o trânsito de potências, sendo realizado um aumento gradual da potência da carga e a matriz Jacobiana resultante desse método é a mesma que a utilizada no método da análise de sensibilidade V-Q, uma vez que se refere às características da rede. A análise da sensibilidade V-Q é feita a partir da análise da sensibilidade $\frac{dq}{dv}$, e análise do sinal destas sensibilidades para todos os barramentos do sistema [1].

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \tag{2.28}$$

ΔP – variações da potência ativa nos barramentos PV e PQ;

ΔQ – variações da potência reativa nos barramentos PQ;

ΔV – variações da tensão nos barramentos PQ;

$\Delta\theta$ – variações do ângulo de tensão nos barramentos PV e PQ;

Os elementos da matriz Jacobiana fornecem informação sobre a sensibilidade entre os fluxos de potência e as variações das tensões nos barramentos, o que permite identificar o ponto de colapso de tensão.

Num SEE a estabilidade de tensão pode ser afetada tanto pelas variações de potência ativa como de potência reativa. Em cada ponto de funcionamento pode-se, contudo, manter a potência ativa constante (ΔP=0) e avaliar a estabilidade de tensão, considerando apenas a relação entre a potência reativa e a tensão, tal como foi considerado nas curvas Q-V [1].

Apesar das variações de potência ativa não serem consideradas nesta formulação, os efeitos da variação de carga, são contabilizados no estudo da relação entre a potência reativa e a tensão, para diferentes condições de operação, uma vez que a potência reativa tem maior influência nos níveis de tensão [1].

Considerando apenas as variações de potência reativa da equação 2.28 obtém-se as seguintes equações:

$$0 = J_{P\theta}\,\Delta\theta + J_{PV}\,\Delta V \tag{2.29}$$

$$\Delta Q = J_{Q\theta}\,\Delta\theta + J_{QV}\,\Delta V \tag{2.30}$$

Da equação 2.29 é possível conhecer o valor da variação do ângulo de tensão:

$$\Delta\theta = -J_{P\theta}^{-1} J_{PV}\,\Delta V \tag{2.31}$$

A equação 2.30 obtém o seguinte aspeto:

$$\Delta Q = J_{Q\theta}\left(-J_{P\theta}^{-1} J_{PV}\right)\Delta V + J_{QV}\,\Delta V$$

$$\Delta Q = \left(J_{QV} - J_{P\theta}^{-1} J_{PV} J_{Q\theta}\right)\Delta V \tag{2.32}$$

Simplificando a equação (2.32):

$$\Delta Q = J_{RQV}\,\Delta V \tag{2.33}$$

$$\Delta V = J_{RQV}^{-1}\,\Delta Q \tag{2.34}$$

A matriz J_{RQV} é a matriz Jacobiana reativa reduzida do sistema,

$$J_{RQV} = \left(J_{QV} - J_{Q\theta}J_{P\theta}^{-1}J_{PV}\right) \tag{2.35}$$

Os elementos da diagonal da matriz J_{RQV}^{-1}, representam a sensibilidade V-Q dos barramentos do sistema. Para melhorar a eficiência computacional, a análise da sensibilidade V-Q é calculada resolvendo a equação 2.33.

A matriz J_{RQV} não preserva a esparsidade característica das matrizes do cálculo do trânsito de potências dos SEE. A matriz inversa da Jacobiana pode ser expressa a partir das matrizes Jacobianas reduzidas:

$$\begin{bmatrix}\Delta\theta\\ \Delta V\end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{RP\theta}^{-1} & -J_{RP\theta}^{-1}J_{PV}J_{QV}^{-1} \\ -J_{RQV}^{-1}J_{PV}J_{P\theta}^{-1} & J_{RQV}^{-1}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta P\\ \Delta Q\end{bmatrix} \tag{2.36}$$

em que $J_{RP\theta}$ é a matriz Jacobiana ativa reduzida do sistema,

$$J_{RP\theta} = \left(J_{P\theta} - J_{PV}J_{QV}^{-1}J_{Q\theta}\right) \tag{2.37}$$

A inversa da matriz Jacobiana completa é influenciada pelas matrizes reduzidas $J_{RP\theta}$ e J_{RQV}. Se uma destas matrizes for singular, vai impedir a inversão completa da matriz Jacobiana. Quando o sistema se encontra no ponto de carregamento máximo, a matriz Jacobiana reativa reduzida (J_{RQV}) é singular. A matriz Jacobiana ativa reduzida ($J_{RP\theta}$) fornece informação modal em comparação com J_{RQV}, uma vez que engloba os barramentos PV e PQ.

A partir da matriz J_{RQV} é possível retirar informação relativa a problemas de estabilidade de tensão relacionado com a potência reativa, enquanto a matriz $J_{RP\theta}$ fornece informação relativa à potência ativa e aos locais da rede onde se devem efetuar as ações de controlo [6].

A sensibilidade V-Q de um barramento representa o declive da curva V-Q num determinado ponto de funcionamento. Uma sensibilidade V-Q positiva corresponde a um ponto de funcionamento estável e quanto menor for a sensibilidade do sistema, mais estável é o sistema. Com a diminuição da estabilidade de tensão o valor da sensibilidade aumenta tornando-se infinita no limite da estabilidade de tensão do sistema.

Caso contrário, se o valor da sensibilidade de V-Q for negativa, o ponto de funcionamento correspondente é instável. Uma sensibilidade negativa muito pequena represente um ponto de funcionamento muito instável [1].

Um sistema é estável se em todos os barramentos a sensibilidade V-Q for positiva. Se em pelo menos um dos barramentos do sistema a sensibilidade V-Q for negativa considera-se o sistema instável.

Devido à não linearidade da relação V-Q, a magnitude das sensibilidades para diferentes condições do sistema, não fornecem uma medida direta do grau de estabilidade. A análise de sensibilidade V-Q não consegue identificar modos individuais de colapso de tensão, em vez disso, fornece informação em relação aos efeitos das variações de tensão-potência reativa [1].

2.4 Análise Modal Q-V

A análise modal V-Q permite ultrapassar as deficiências apresentadas pela análise de sensibilidade, uma vez que acrescenta a vantagem de fornecer informação relativamente aos mecanismos de instabilidade. A análise modal baseia-se na matriz Jacobiana reativa reduzida J_{RQV} utilizada na análise de sensibilidade Q-V, pelo que a análise de sensibilidade serve de introdução para a análise modal Q-V.

A análise da estabilidade de tensão de um sistema pode ser feita através do cálculo dos menores valores e vetores próprios da matriz Jacobiana reativa reduzida J_{RQV} de forma a prever a instabilidade de tensão. Os valores próprios determinam o modo do sistema, enquanto os vetores próprios fornecem uma medida aproximada para a instabilidade do sistema [1, 2, 16].

Entende-se por modo, um comportamento transitório com uma única constante de tempo, monotonamente crescente ou decrescente, ou um único amortecimento e frequência, modos oscilatórios. Para cada modo existe um valor e um vetor próprio esquerdo e direito associados a ele [6].

Os valores próprios da matriz reduzida J_{RQV} identificam os diferentes modos pelos quais o sistema se pode tornar instável. A partir do cálculo dos vetores próprios esquerdos e direitos definem-se fatores de participação dos barramentos de carga nos diferentes modos. A partir destes fatores é possível retirar informação sobre quais os elementos que contribuem para a instabilidade, assim como as áreas mais sensíveis a problemas de estabilidade de tensão [16].

Assim sendo,

$$J_{RQV} = \xi \Lambda \eta \tag{2.38}$$

onde,

- ξ – vetor próprio direito da matriz J_{RQV}
- Λ – valor próprio da matriz J_{RQV}
- η – vetor próprio esquerdo da matriz J_{RQV}

A partir da equação 2.36,

$$J_{RQV}^{-1} = \xi \Lambda^{-1} \eta \tag{2.39}$$

Substituindo a equação 2.37 na equação 2.34,

$$\Delta V = \xi \Lambda^{-1} \eta \, \Delta Q \tag{2.40}$$

ou

$$\Delta V = \sum_i \frac{\xi_i \eta_i}{\lambda_i} \Delta Q \tag{2.41}$$

onde, ξ_i é a i-ésima coluna do vetor próprio e η_i é a i-ésima linha do vetor próprio esquerdo da matriz J_{RQV}. Cada valor próprio λ_i e o corresponde vetor esquerdo e direito definem o modo de estabilidade do sistema. Se o valor próprio λ_i for próximo de zero, a uma pequena variação na potência reativa origina grandes variações na tensão de um ou vários barramentos [16].

Uma vez que, $\xi^{-1} = \eta$ a equação 2.40 pode ser reformulada sendo:

$$\eta \, \Delta V = \Lambda^{-1} \eta \, \Delta Q$$

ou,

$$v = \Lambda^{-1} q \tag{2.42}$$

onde,

v = ηΔV é o vetor das variações modais de tensão

q = ηΔQ é o vetor das variações modais de potência reativa

Comparativamente com a equação 2.34, na equação 2.42 Λ^{-1} é uma matriz diagonal, enquanto J_{RQV} geralmente é não diagonal, e a equação 2.42 representa equações de primeira ordem [1].

$$\Lambda^{-1} = \begin{bmatrix} \lambda_1^{-1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2^{-1} & & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_n^{-1} \end{bmatrix}$$

A equação 2.42 pode ser representada matricialmente por:

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_1^{-1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2^{-1} & & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_n^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix} \tag{2.43}$$

Assim, para o i-ésimo modo,

$$v_i = \frac{1}{\lambda_i} q_i \tag{2.44}$$

Se $\lambda_i>0$, a variação da i-ésima tensão modal e da i-ésima potência reativa modal, são na mesma direção, o que indica que o sistema funciona em condições de estabilidade de tensão. Por outro lado se $\lambda_i<0$, a i-ésima tensão modal e a i-ésima potência reativa modal têm direções opostas, o que indica que o sistema está numa situação de instabilidade de tensão, em que um aumento da potência reativa provoca um decréscimo nos níveis de tensão.

Quando $\lambda_i=0$, à i-ésima tensão modal corresponde o colapso de tensão, uma vez que uma variação da potência reativa modal provoca uma variação infinita na tensão modal.

O valor de λ_i determina o grau de estabilidade da i-ésima tensão modal. Quanto menor for o valor positivo λ_i, mais significa que a i-ésima tensão modal está mais próxima da instabilidade. Assim, λ_i mede a proximidade do sistema à instabilidade de tensão. Os valores próprios não fornecem, contudo, uma medida absoluta, devido à não linearidade do problema [1, 16].

A análise de estabilidade feita a partir da análise modal, passa por observar os valores próprios da matriz J_{RQV}. Se todos os valores próprios da matriz J_{RQV} forem, o sistema é estável, por outro lado, caso um dos valores próprios seja nulo ou negativo o sistema é instável.

É impraticável e desnecessário calcular todos os valores próprios de J_{RQV}, uma vez que existem sistemas com um número elevado de barramentos muito elevados. Por outro lado também não é suficiente calcular o valor próprio mínimo da matriz J_{RQV}, porque geralmente existe mais do que um modo referente à instabilidade do sistema, para áreas diferentes, e o modo com o menor valor próprio pode não ser o que causa maiores problemas na estabilidade de tensão. Na prática calculam-se os 5 a 10 menores valores próprios para identificar os modos mais críticos [1]. Contudo, o menor valor próprio nem sempre indica a estabilidade de tensão, pois pode não representar o modo crítico do sistema.

Quando a i-ésima tensão modal entra em colapso, não implica que as restantes tensões modais entrem em colapso também. O colapso de tensão do sistema é uma tensão modal, ou seja, o sistema não suporta uma combinação de cargas reativas.

Os fatores de participação fornecem informação importante sobre as áreas do sistema mais vulneráveis em cada modo, estabelecendo assim uma relação entre os valores próprios e os barramentos do sistema. Os fatores de participação são calculados através do produto entre os vetores próprios, direito e esquerdo, da matriz J_{RQV}.

$$P_{ki} = \xi_{ki}\eta_{ki} \tag{2.45}$$

P_{ki} define a contribuição que o valor próprio λ_i tem na análise de sensibilidade V-Q no barramento k. Quanto maior o valor de P_{ki} mais λ_i contribui na determinação da sensibilidade V-Q no barramento k.

Quando o SEE se encontra próximo do ponto crítico de estabilidade de tensão, a análise modal ajuda a determinar as áreas críticas e os elementos que contribuem para essa instabilidade em cada modo. A partir desta análise é possível determinar quais as zonas e barramentos que necessitam de uma compensação de energia reativa [16].

A análise modal não deve ser sobrestimada, pois recorre a uma simplificação, que é a linearização do sistema, o que geralmente não se verifica nos SEE. Outro problema da análise modal é não considerar as variações da potência ativa, assim quando o sistema se encontra próximo do ponto crítico, a matriz Jacobiana reativa reduzia aproxima-se da singularidade e nesse ponto nem só as variações de potência reativa influenciam a estabilidade de tensão, podendo as variações da potência ativa influenciar os níveis de tensão [6].

Os métodos apresentados até agora permitem estudar a estabilidade de tensão dos SEE. Uma boa solução para prever a proximidade do ponto de colapso de tensão, são os índices de estabilidade de tensão, que vão ser apresentados de seguida.

2.5 Índices de Estabilidade de tensão

O aumento da eficiência do uso das linhas de transmissão dos SEE, levou a uma situação em que os sistemas funcionam nas horas de maior consumo de energia, por períodos de tempo maiores perto dos limites de estabilidade de tensão, resultando numa maior probabilidade de ocorrerem situações de instabilidade ou até mesmo de colapsos de tensão. Com estas condições de funcionamento qualquer distúrbio pode colocar a estabilidade do sistema em causa.

Surge assim a necessidade de encontrar métodos que consigam prever o nível de estabilidade de tensão ao longo do funcionamento do sistema, e alertar para os operadores do

sistema para tomar medidas preventivas para garantir o correto funcionamento do sistema [17].

Existem vários métodos para analisar a estabilidade de tensão de um sistema, sendo muitos desses métodos baseados nos índices de estabilidade de tensão. Os índices de estabilidade de tensão preveem a proximidade do sistema ao ponto de colapso de tensão e podem ser utilizados numa monitorização *on-line* ou *off-line* pelos operadores para determinarem essa proximidade.

O objetivo dos índices de estabilidade de tensão é definir um valor escalar que permita monitorizar o sistema à medida que os parâmetros do sistema se alteram. Estes índices devem ter uma ação previsora e regular para que as previsões feitas possam ser aproveitadas, para além disso, o cálculo computacional não deve ser muito pesado, para garantir tempos de resposta curtos o que é importante principalmente nas monitorizações *on-line*.

Existem vários índices de estabilidade de tensão, sendo eles referentes geralmente aos barramentos dos sistemas ou então às linhas de transmissão, ou então, sendo índices globais de estabilidade do sistema.

De seguida são apresentados alguns índices de estabilidade de tensão referente às linhas de um sistema.

2.5.1 Índice Lmn

O índice Lmn proposto em [26], é um índice baseado no conceito de trânsito de potência numa linha de transmissão, que permite calcular a estabilidade de tensão numa linha, procurando detetar as condições a que as linhas do sistema estão sujeitas e, assim, prever o colapso de tensão da linha. Onde o discriminante da equação quadrática da equação resultante, tem de ser maior ou igual a zero para garantir a estabilidade do sistema. Se o discriminante for menor que zero os zeros da equação serão imaginários o que implica a instabilidade do sistema. As linhas que possuem valores de Lmn próximas de 1 apresentam valores próximos do colapso de tensão por isso para garantir a estabilidade do sistema Lmn também deve ser inferior a 1 [2, 8].

A formulação deste índice apresenta-se de seguida.

Uma linha de transmissão tem os seguintes parâmetros:

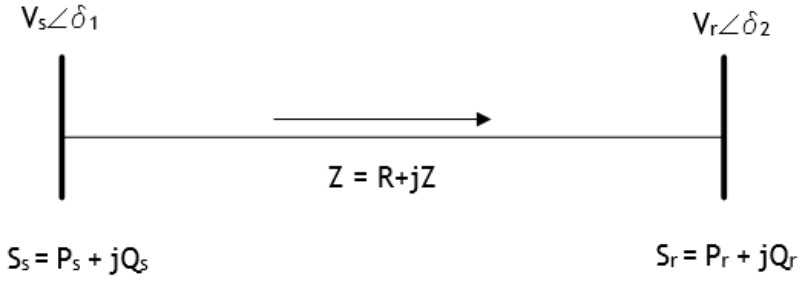


Figura 2.9 -Parâmetros linha transmissão

O barramento com o índice S corresponde ao barramento emissor e o barramento com o índice R corresponde ao barramento recetor. A potência em cada barramento pode ser expressa pelas seguintes equações tendo como base o modelo em π das linhas de transmissão.

$$S_r = \frac{|V_s||V_r|}{Z}\angle(\theta - \delta_1 + \delta_2) - \frac{|V_r|^2}{Z}\angle\theta \tag{2.46}$$

$$S_s = \frac{|V_s|^2}{Z}\angle\theta - \frac{|V_s||V_r|}{Z}\angle(\theta + \delta_1 - \delta_2) \tag{2.47}$$

As equações anteriores podem ser divididas em parte real e imaginária:

$$P_r = \frac{|V_s||V_r|}{Z}cos(\theta - \delta_1 + \delta_2) - \frac{|V_r|^2}{Z}cos\theta \tag{2.48}$$

$$Q_r = \frac{|V_s||V_r|}{Z}sen(\theta - \delta_1 + \delta_2) - \frac{|V_r|^2}{Z}sen\theta \tag{2.49}$$

$$= |V_r|^2 sen\theta - |V_s||V_r|sen(\theta - \delta_1 + \delta_2) + ZQ_r = 0 \tag{2.50}$$

Considerando $\delta_1 - \delta_2 = \delta$ na equação 2.49 e resolvendo em relação a V_r,

$$V_r = \frac{V_s\, sen(\theta - \delta) \pm \sqrt{\left(V_s\, sen\,(\theta - \delta)\right)^2 - 4ZQ_r\, sen\,\theta}}{2\, sen\,\theta} \tag{2.51}$$

onde,

$Z = \sqrt{(R^2 + X^2)}$ é a impedância da linha

$\theta = tan^{-1}\left({}^{X}/_{R}\right)$

E sendo $Z\ sen\ \theta = X$ temos que

$$V_r = \frac{V_s\, sen(\theta - \delta) \pm \sqrt{\left(V_s\ sen\ (\theta - \delta)\right)^2 - 4XQ_r}}{2\ sen\ \theta} \tag{2.52}$$

De forma a obter valores reais para V_r dependendo de Q_r a equação (2.52) deve ter valores reais. Por forma a garantir isso o discriminante deve ser maior ou igual a zero. Assim sendo,

$$\left(V_s\ sen\ (\theta - \delta)\right)^2 - 4XQ_r \geq 0 \tag{2.53}$$

ou então,

$$Lmn = \frac{4XQ_r}{\left(V_s\ sen\ (\theta - \delta)\right)^2} \leq 1 \tag{2.54}$$

Onde,

X é a reatância da linha;

Q_R é a potência no barramento R;

Vs á a tensão do barramento S;

Θ é o ângulo da impedância da linha

δ é a diferença entre os ângulos de tensão do barramento S e R.

Lmn é o índice de estabilidade para a linha.

O índice Lmn é influenciado pelo valor da potência reativa do barramento recetor, diminuindo com a potência reativa, o que é um parâmetro que se pode controlar no sistema.

Para garantir a estabilidade de tensão o índice Lmn deve ser inferior a 1 [8, 18]. Quando este índice ultrapassa este valor o sistema perde a estabilidade e passa a estar numa situação de instabilidade de tensão. Quando o índice tem valor 0 corresponde a uma situação em que não há carga. A equação 2.53 é usada para calcular o índice de estabilidade de tensão de uma linha entre dois barramentos, usando esta formulação é possível calcular os índices de estabilidade para todas as linhas de um SEE com um elevado número de linhas. Os parâmetros necessários para o cálculo do índice Lmn podem ser obtidos a do método Newton-Raphson utilizado no cálculo do trânsito de potências.

2.5.2 Índice LQP

O índice LQP é um índice de estabilidade de tensão introduzido em [19], usado para analisar a estabilidade nas linhas. Baseia-se no conceito de transmissão de potência numa linha. A figura 2.10 representa um esquema unifilar de uma linha de transmissão de um SEE.

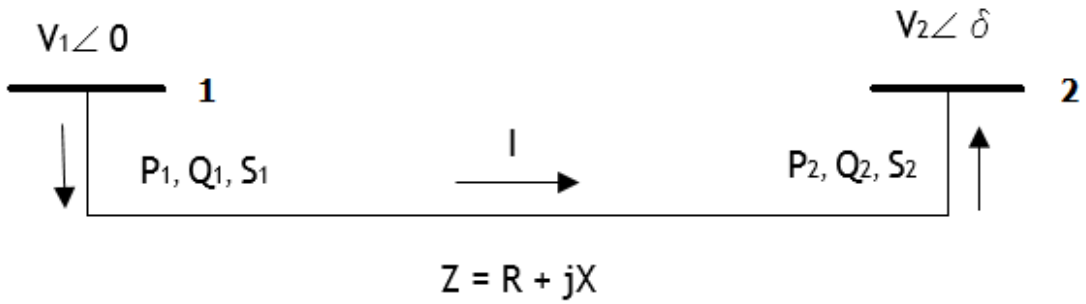


Figura 2.10 - Linha de transmissão entre 2 barramentos

Na figura 2.10:

V_1, V_2 é a tensão nos barramentos 1 e 2 respetivamente;

P_1, Q_1 é a potência ativa e reativa no barramento 1;

P_2, Q_2 é a potência ativa e reativa no barramento 2;

S_1, S_2 é a potência aparente no barramento 1 e 2;

δ é o ângulo da tensão no barramento 2;

R é a resistência da linha;

X é a reatância da linha.

A corrente I entre o barramento 1 e 2 pode ser expressa da seguinte forma:

$$I = \frac{V_1 \angle 0 - V_2 \angle \delta}{R + jX} \tag{2.55}$$

A potência do barramento 2 é calculada a partir da seguinte expressão:

$$\underline{S} = P + jQ = \underline{VI^*} = V_2 \left(\frac{\underline{V_1} - \underline{V_2}}{\underline{Z}} \right)^* \tag{2.56}$$

Separando a parte ativa e reativa da potência aparente, obtêm-se as equações 2.57 e 2.58 apresentadas na demonstração das curvas P-V e podem tomar o seguinte aspeto:

$$P_2 = \left[(V_1 cos\delta - V_2)\frac{R}{R^2 + X^2} - V_1 sin(\delta)\frac{X}{R^2 + X^2}\right]V_2 \quad (2.57)$$

$$Q_2 = \left[(V_1 cos\delta - V_2)\frac{X}{R^2 + X^2} - V_1 sin(\delta)\frac{R}{R^2 + X^2}\right]V_2 \quad (2.58)$$

Considerando a resistência da linha desprezável, R/X<< 1, tem-se que:

$$P_2 = \frac{V_1 V_2 sin\delta}{X} \leftrightarrow sin\delta = \frac{XP_2}{V_1 V_2} \quad (2.59)$$

$$Q_2 = \frac{V_1 V_2 cos\delta - {V_2}^2}{X} \leftrightarrow cos\delta = \frac{XQ_2 - {V_2}^2}{V_1 V_2} \quad (2.60)$$

Somando o quadrado das expressões 2.59 e 2.60, obtém-se a seguinte expressão (2.61):

$$\left(\frac{XP}{V_1 V_2}\right)^2 + \left(\frac{XQ - {V_2}^2}{V_1 V_2}\right)^2 = sin^2\delta + cos^2 = 1 \quad (2.61)$$

Igualando a expressão anterior a 0:

$${V_2}^4 + \left(2XQ_2 - {V_1}^2\right){V_2}^2 + X^2{Q_2}^2 + {P_2}^2X^2 = 0 \quad (2.62)$$

Atendendo a que expressão 2.62 é uma equação de 2º grau de V_2^2, para ter uma solução real, o discriminante deve ser maior ou igual a zero.

$$\left(2XQ_2 - {V_1}^2\right)^2 - 4\left(X^2{Q_2}^2 + {P_2}^2X^2\right) \geq 0 \quad (2.63)$$

Assim,

$$Q_2 \leq \frac{{V_1}^2}{4X} - \frac{{P_2}^2X}{{V_1}^2} \quad (2.64)$$

Como a resistência da linha é aproximadamente 0, não existem perdas ativas nas linhas, pelo que $P_1 = - P_2$.

$$4\left(\frac{X}{{V_1}^2}\right)\left(\frac{X}{{V_1}^2}{P_1}^2 + Q_2\right) \leq 1 \quad (2.65)$$

Considerando a potência ativa, o índice de estabilidade da linha LQP é definido como:

$$LQP_{ij} = 4\left(\frac{X}{{V_i}^2}\right)\left(\frac{X}{{V_i}^2}{P_i}^2 + Q_j\right) \tag{2.66}$$

Onde,

X é a reatância da linha;

Q_j é a potência reativa no barramento j;

V_i é a tensão no barramento i;

P_i é a potência ativa no barramento i.

O índice LQP deve ser inferior a 1 para o sistema ser estável. Quando o índice está próximo de 1 implica que o sistema está próximo do limite de carga e está próximo da instabilidade. Neste índice tanto a potência ativa como a potência reativa estão diretamente envolvidas no seu cálculo [7,20].

2.5.3 Índice FVSI

O índice de estabilidade de tensão FVSI (*Fast Voltage Stability Index*) apresentado em [22] tem como base as mesma técnicas utilizadas no cálculo do índice de estabilidade LPQ, pelo que o discriminante da equação quadrática da tensão tem de ser maior ou igual a zero. O limite máximo do índice é 1, pelo que, a partir deste limite, o sistema entra em instabilidade de tensão [21].

O índice FVSI tem como base a equação quadrática da tensão de um sistema com dois barramentos e uma linha como a apresentada na figura 2.10.

A corrente I na linha é dada pela expressão 2.54. A tensão no barramento 1 é definida como a tensão de referência, sendo o ângulo igual a zero. A potência aparente no barramento 2 é a mesma que a calculada pela expressão 2.55 e, a partir desta expressão, a corrente pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$I = \left(\frac{S_2}{V_2}\right)^* = \frac{P_2 - jQ_2}{V_2 \angle -\delta} \tag{2.67}$$

Igualando a expressão 2.67 com a expressão 2.55, obtém-se:

$$\frac{P_2 - jQ_2}{V_2 \angle -\delta} = \frac{V_1 \angle 0 - V_2 \angle \delta}{R + jX}$$

$$V_1 V_2 \angle -\delta - {V_2}^2 = (R + jX)(P_2 - jQ_2) \tag{2.68}$$

Separando a parte real e a imaginária:

$$V_1 V_2 cos\delta - {V_2}^2 = RP_2 + XQ_2 \tag{2.69}$$

$$-V_1 V_2 sen\delta = XP_2 - RQ_2 \tag{2.70}$$

A equação 2.69 pode tomar o seguinte aspeto:

$$P_2 = \frac{RQ_2 - V_1 V_2 sen\delta}{X} \tag{2.71}$$

Substituindo a equação 2.71 na equação 2.69:

$${V_2}^2 - \left(\frac{R}{X} sen\delta + cos\delta\right) V_1 V_2 + \left(X + \frac{R^2}{X}\right) Q_2 = 0 \tag{2.72}$$

A equação 2.72, é a equação quadrática da tensão e para obter soluções reais o discriminante tem de ser superior ou igual a zero:

$$\left[\left(\frac{R}{X} sen\delta + cos\delta\right) V_1\right]^2 - 4\left(X + \frac{R^2}{X}\right) Q_2 \geq 0 \tag{2.73}$$

Rearranjando a equação 2.73,

$$\frac{4\left(X + \frac{R^2}{X}\right) Q_2}{\left[\left(\frac{Rsen\delta + Xcos\delta}{X}\right) V_1\right]^2} \leq 1$$

$$\frac{4Z^2 Q_2 X}{{V_1}^2 (Rsen\delta + Xcos\delta)^2} \leq 1 \tag{2.74}$$

O ângulo de tensão nos barramentos a montante, geralmente é muito pequeno, por isso δ=0, o que implica:

$$Rsen\delta \approx 0$$

$$Xcos\delta \approx 1$$

Considerando o que o barramento i é o barramento emissor e o barramento j é o barramento recetor, o índice FVSI pode ser definido como:

$$FVSI = \frac{4{Z_{ij}}^2 Q_j}{{V_i}^2 X} \tag{2.75}$$

onde,

Z é a impedância da linha;

X_{ij} é a reatância da linha;

Q_j é a potência reativa no barramento j;

V_i é a tensão no barramento i.

Se o valor de FVSI for próximo de 1, indica que a linha está próxima do ponto de instabilidade, portanto o índice de estabilidade deve ser mantido abaixo de 1 para garantir a estabilidade de tensão [21, 23]. O índice FVSI representa a estabilidade do sistema em termos de potência reativa de carga, mas o seu desempenho não é o melhor a nível de potência ativa, uma vez que a relação com a potência ativa é feita através de uma forma indireta a partir da tensão nos barramentos [7, 20].

O índice FVSI pode ser usado também para determinar o barramento mais vulnerável a situações de instabilidade do sistema. A determinação do barramento mais vulnerável baseia-se no máximo de carga que um barramento suporta. Assim, o barramento mais vulnerável é o barramento que possui o máximo de carga admissível [8].

2.5.4 Índice LCPI

Em [17], Rajive Tiwari, et al. propõem o índice de estabilidade LCPI (*Line Collapse Proximity Index*). Os índices apresentados anteriormente não tinham em conta as susceptâncias (ou reactâncias de carga) das linhas de transmissão, quando representadas pelo modelo em π. Assim, este parâmetro da linha pode ajudar na estabilidade de tensão.

Os métodos que utilizam aproximações podem inserir algumas incertezas nas previsões de estabilidade de tensão, para além disso, os índices não consideram a influência da potência ativa, apenas considerando a potencia reativa. Estas considerações podem levar a previsões de estabilidade de tensão erradas em alguns casos [17].

O índice LCPI não se baseia apenas no modelo exato das linhas de transmissão mas considera para além dos efeitos da potência reativa os efeitos da potência ativa do sistema. Um modelo exato para representar as linhas de transmissão é um modelo baseado em circuitos equivalentes baseado em quadripolos, que usam a matriz ABCD. O índice LCPI é derivado dos parâmetros da matriz ABCD de uma linha de transmissão e tem como base a equação quadrática da tensão de um sistema com dois barramentos [17]. O modelo π de uma linha de transmissão é representado na figura 2.11.

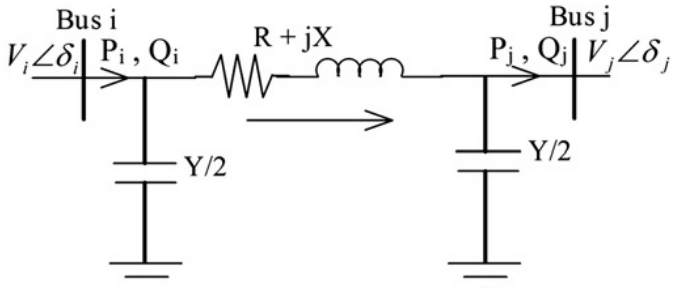


Figura 2.11 - Modelo em π de um sistema de 2 barramentos [17]

A relação entre os parâmetros da rede pode ser expressa como:

$$\begin{bmatrix} V_i \\ I_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_j \\ I_j \end{bmatrix} \tag{2.76}$$

onde A, B, C e D são os parâmetros de transmissão do quadripolo, e têm a seguinte relação com os parâmetros da linha,

$$A = 1 + \frac{ZY}{2} \tag{2.77}$$

$$B = Z \tag{2.77}$$

$$C = 1 + \frac{ZY}{4} \tag{2.78}$$

$$D = A \tag{2.79}$$

Os parâmetros Z e Y representam a impedância da linha e a admitância de carga da linha respetivamente.

A corrente no barramento j é expressa pela seguinte expressão:

$$I_j = \frac{(P_j - jQ_j)}{V_j^*} = \frac{(P_j - jQ_j)}{V_j \angle -\delta_j} \tag{2.80}$$

Usando os parâmetros da matriz ABCD a tensão no barramento i pode ser expressa como:

$$V_i \angle \delta_i = A\angle\alpha \times V_j \angle \delta_j + B\angle\beta \times I_j \tag{2.81}$$

Na expressão 2.82 A e B representam magnitudes enquanto α e ß representam os ângulos de fase. Substituindo o valor de I_j obtido da equação 2.81 na equação 2.82:

$$V_i \angle \delta_i = A\angle\alpha \times V_j \angle \delta_j + B\angle\beta \times \frac{(P_j - jQ_j)}{V_j \angle -\delta_j}$$

$$V_i V_j \angle \delta = A\angle\alpha \times V_j^2 + B\angle\beta \times (P_j - jQ_j) \tag{2.82}$$

em que $\delta = \delta_i - \delta_j$.

Separando a equação 2.83 em parte real e parte imaginária obtém-se a expressão quadrática:

$$V_j^2 (A\cos\alpha) - V_j(V_i\cos\delta) + (P_j B\cos\beta + Q_j sen\beta) = 0 \tag{2.83}$$

Para garantir soluções de V_j reais e maiores que zero da expressão anterior, o descriminante da fórmula resolvente deve ser maior que zero.

$$(V_i\cos\delta)^2 + 4A\cos\alpha(P_j B\cos\beta + Q_j sen\beta) > 0 \tag{2.84}$$

Rearranjando a equação 2.85, a condição para garantir a estabilidade do sistema é a seguinte:

$$\frac{4Acos\alpha\left(P_iBcos\beta + Q_jsen\beta\right)}{(V_icos\delta)^2} < 1 \tag{2.85}$$

A formulação final para o índice de estabilidade de tensão LCPI é:

$$LCPI = \frac{4Acos\alpha\left(P_iBcos\beta + Q_jsen\beta\right)}{(V_icos\delta)^2} \tag{2.86}$$

Para garantir a estabilidade do sistema, o índice LCPI tem que ser menor que 1, pois quando se aproxima da unidade a linha referente encontra-se perto do colapso de tensão.

O termo P_jBcosβ na equação 2.87, representa a resistência na linha mas o primeiro termo da equação representa a queda de tensão devido à potência ativa na linha P_j. Da mesma forma, o segundo termo Q_jBsenβ representa a queda de tensão devido à potência reativa da linha Q_j. Se a potencia ativa e reativa tiverem o mesmo sinal, o trânsito de potência das duas linhas dá-se no mesmo sentido, caso contrário têm sentidos opostos. Assim sendo, o índice LCPI tem em conta a quantidade de potência ativa e reativa e a direção em que flui, no barramento j.

Além disso, o índice LCPI considera todos os parâmetros de uma linha de transmissão. Os valores utilizados A, B, α, ß, são obtidos a partir dos parâmetros da rede, enquanto os valores de P Q V e δ podem ser obtidos a partir de um programa de simulação de transito de potencias [17].

2.6 Conclusão

Os índices de estabilidade apresentados neste capítulo permitem analisar o problema da estabilidade de tensão, o qual tem sido responsável por vários colapsos dos SEE. Foram apresentados os fundamentos dos índices de estabilidade de tensão, assim como outras técnicas utilizadas na análise do problema da estabilidade de tensão. Os índices apresentados podem ser obtidos a partir das características da rede e através do resultado do trânsito de potências do SEE em estudo, de forma a identificar as linhas criticas, as quais podem ser responsáveis pela instabilidade do sistema.

Capítulo 3

Estudo dos Índices de Estabilidade de Tensão

No capítulo anterior foram apresentados várias formas de analisar a estabilidade de tensão de um SEE. Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados dos testes realizados numa rede de teste dos índices de estabilidade LQP, Lmn, FVSI e LCPI.

3.1 Rede teste

A rede de teste utilizada para o cálculo dos índices de estabilidade de tensão, foi a rede de 30 barramentos proposta pelo IEEE. Esta rede é constituída por 6 barramentos geradores, 24 barramentos de carga e por 43 linhas sendo que os barramentos 1 e 2 e os barramentos 10 e 21 são ligados por duas linhas. O barramento de referência da rede é o barramento 1, como é possível verificar na figura 3.1.

Os parâmetros das linhas podem ser consultados no Anexo A, assim como o trânsito de potências para o caso base.

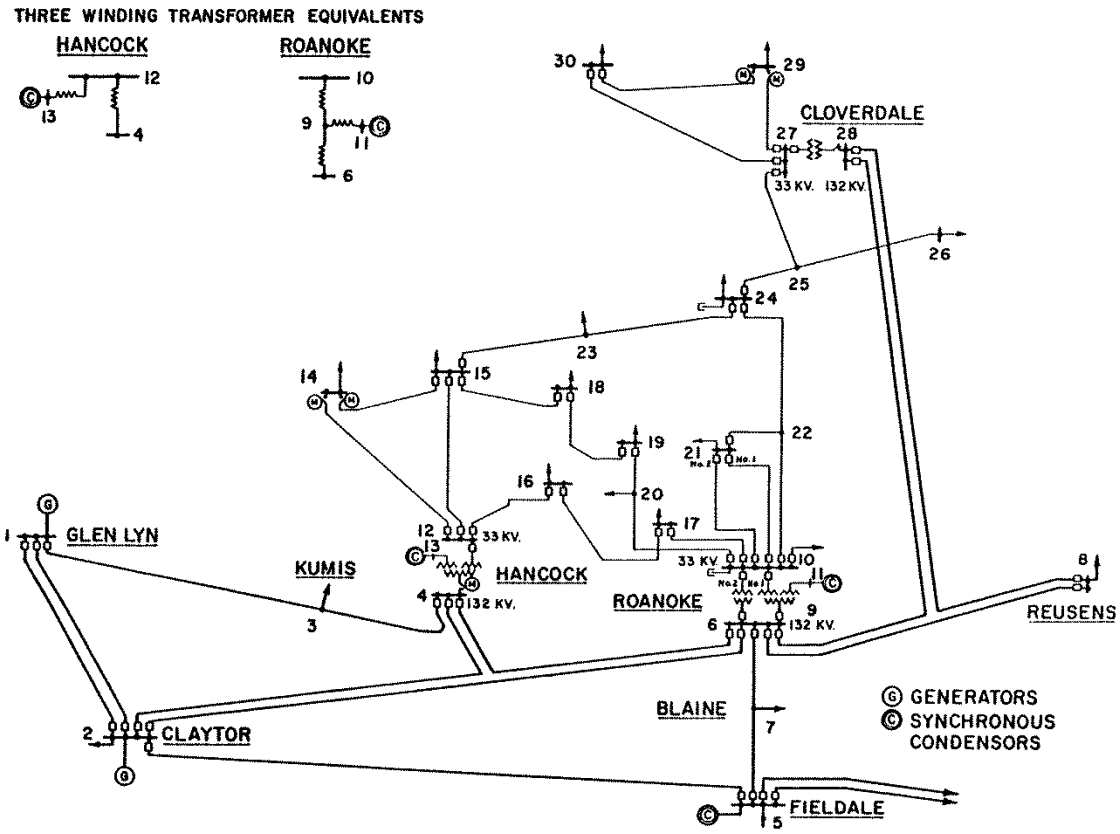


Figura 3.1 - Rede teste IEEE de 30 barramentos

O estudo dos índices de estabilidade é feito através de simulações usando *softwares* específicos [24]. O *software* utilizado para o cálculo dos índices de estabilidade foi o PowerWorld para obter os resultados do trânsito de potências e o programa de cálculo Excel para obter os resultados.

O cálculo dos índices de estabilidade de tensão pode ser obtido de várias formas:

- Variação da potência reativa de carga num barramento;
- Variação da potência ativa de carga de um barramento;
- Variação da potência reativa de todas as cargas do sistema.

Para o cálculo dos índices de estabilidade de tensão não são considerados limites nas linhas. É ainda necessário definir um caso base e, a partir daí, aplicar um dos métodos apresentados.

No caso base as cargas do sistema foram fixadas nos valores da rede IEEE de 30 barramentos. O trânsito de potências obtido para o caso base pode ser consultado no anexo A. Na figura 3.2 apresenta-se o resultado do esquema unifilar resultante do PowerWorld.

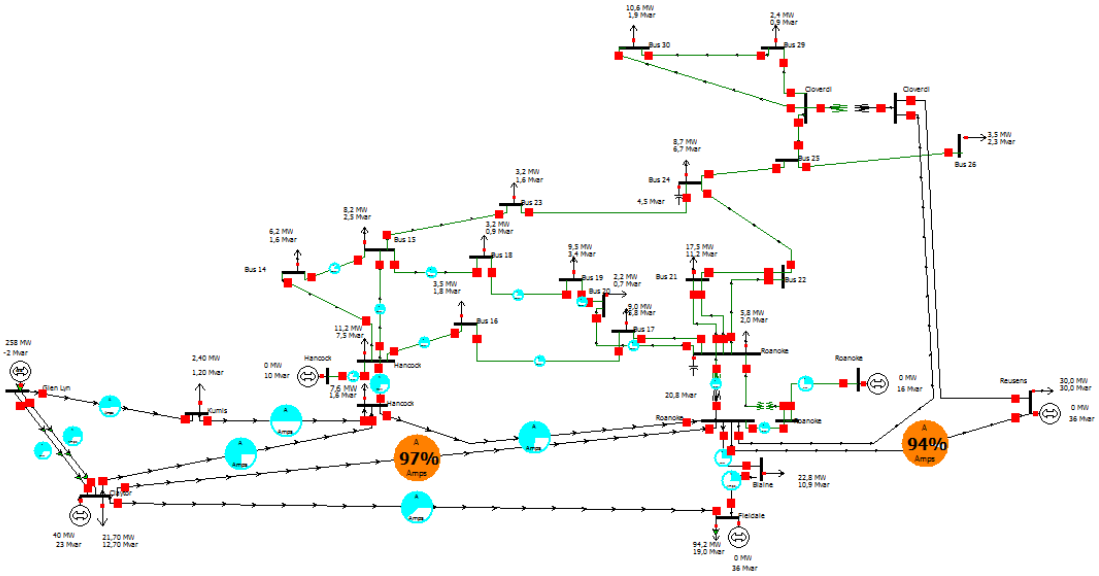


Figura 3.2- Esquema unifilar da rede IEEE de 30 Barramentos

Os gráficos com os valores dos índices calculados são apresentados nas figuras 3.3 a 3.6.

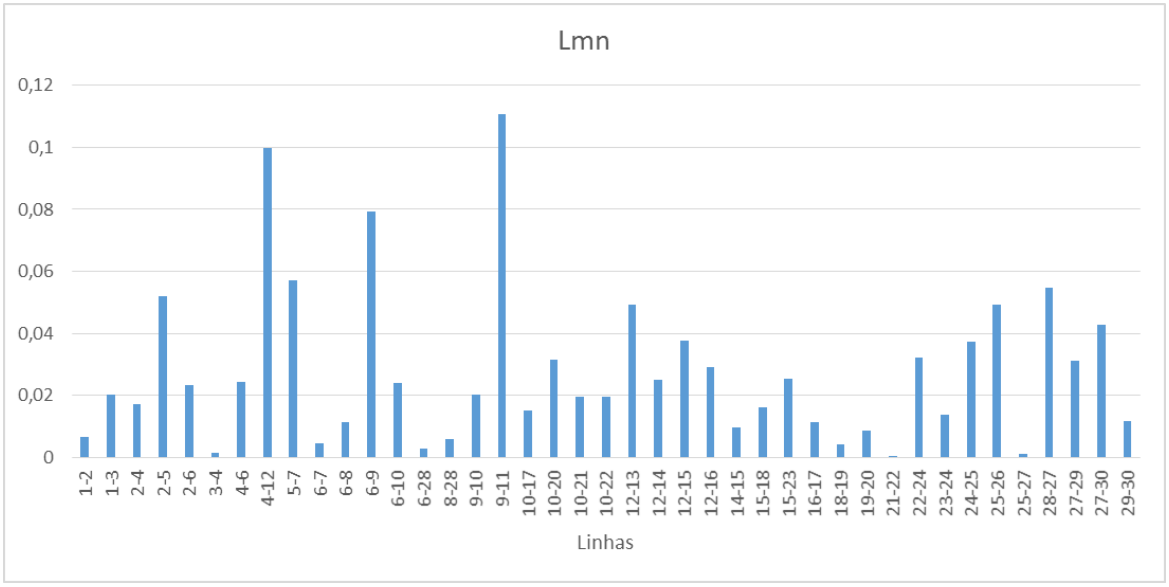


Figura 3.3 - Índices Lmn das linhas da rede IEEE 30 barramentos

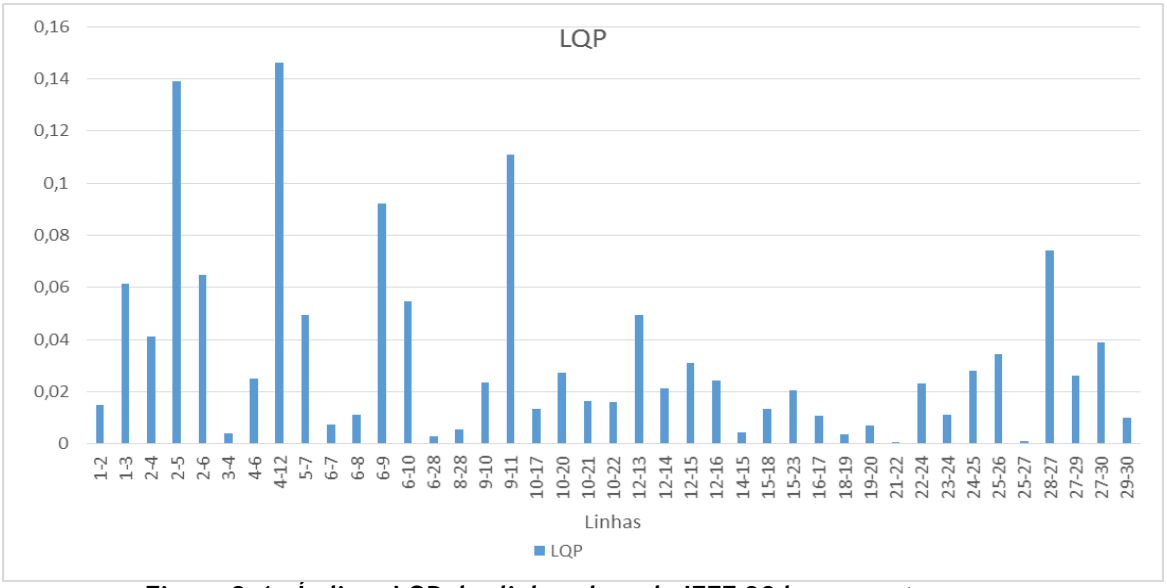


Figura 3.4 - Índices LQP das linhas da rede IEEE 30 barramentos

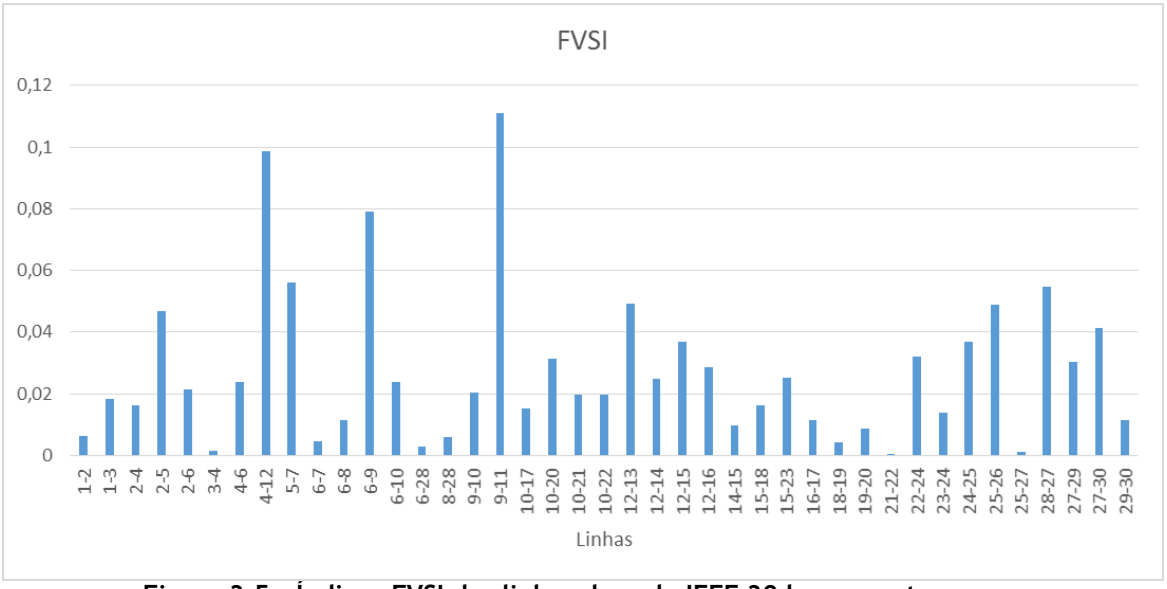


Figura 3.5 - Índices FVSI das linhas da rede IEEE 30 barramentos

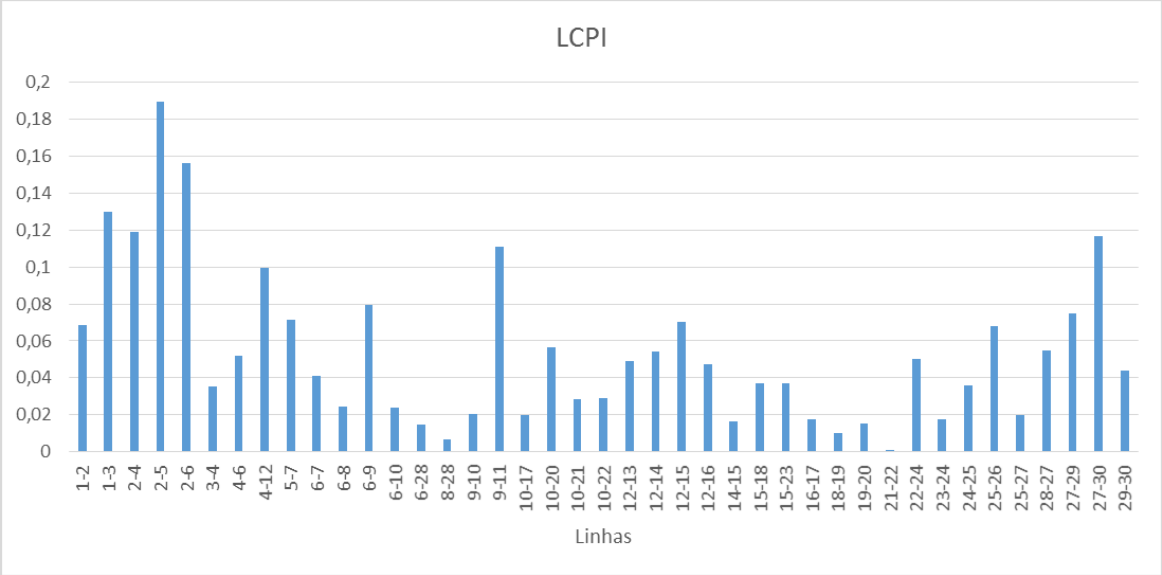


Figura 3.6 - Índices LCPI das linhas da rede IEEE 30 barramentos

A partir das figuras 3.3 a 3.6 apresentadas podemos verificar que nenhuma linha ligada a um barramento está próxima do colapso de tensão. Os valores dos índices são próximos, mas os índices LQP e LCPI apresentam valores mais elevados, uma vez que consideram o trânsito de potência ativa nas linhas para a análise da estabilidade de tensão.

O índice LCPI apresenta um valor ligeiramente mais elevado que o índice LQP uma vez que este considera a resistência e a susceptância das linhas. Por exemplo a linha 2-5, que tem uma resistência e uma susceptância mais elevada, comparativamente com as outras linhas, tem um valor mais elevado do índice LCPI do que do índice LQP.

De forma a obter uma melhor compreensão da evolução dos índices de estabilidade, quando o sistema se aproxima do colapso de tensão, serão efetuados estudos aplicando as técnicas apresentadas anteriormente.

3.2 Variação da potência reativa de carga num barramento

Para analisar os índices de estabilidade de tensão, por alteração da potência reativa consumida num barramento, foi utilizada a rede teste IEEE de 30 barramentos.

Para efetuar esta análise, partiu-se do caso base apresentado anteriormente e, de seguida, realizaram-se os seguintes passos:

- Aumentar gradualmente a potência reativa apenas num barramento, até que a solução do trânsito de potências deixe de convergir ou se atinja a proximidade do ponto de colapso de tensão;
- Calcular o valor do índice em estudo para o valor de potência reativa (Q).

- Obter o gráfico do índice em estudo (Lmn, LQP, FVSI, LCPI) em função da potência reativa Q;

- Determinar qual a linha do sistema que apresenta maiores valores dos índices de forma a identificar as linhas mais críticas. A linha em causa pode ou não estar ligada ao barramento em estudo.

Estes passos foram realizados para alguns barramentos do sistema e para todos os índices apresentados no Capítulo 2, secção 2.5, e são apresentados de seguida.

3.2.1 Índice Lmn

Para o estudo dos índices de estabilidade de tensão foram selecionados os barramentos 3, 4, 5, 6, 15, 19, 30. Assim sendo, a potência reativa destes barramentos foi incrementada até que a solução do trânsito de potências deixe de convergir tendo sido registada a evolução dos índices.

Recorde-se a expressão do índice de Lmn, apresentada anteriormente:

$$Lmn = \frac{4XQ_r}{\left(V_s\ sen\ (\theta - \delta)\right)^2} \leq 1 \qquad (3.1)$$

Os gráficos apresentados nas figuras 3.7 a 3.12 apresentam os resultados obtidos para o índice Lmn. Em cada gráfico a linha que apresentar o maior valor do índice de estabilidade de tensão será a linha mais crítica do sistema.

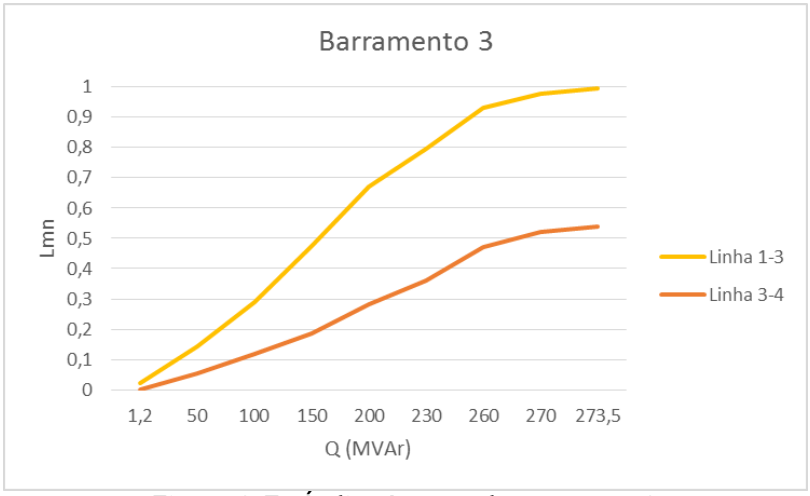


Figura 3.7 - Índice Lmn no barramento 3

A partir da análise da figura 3.7, referente ao barramento 3 conclui-se que a linha 1-3 é a linha crítica, pois apresenta o maior valor de Lmn. O valor do índice Lmn da linha 1-3 é de 0.9953 e o da linha 3-4 é 0.5403.

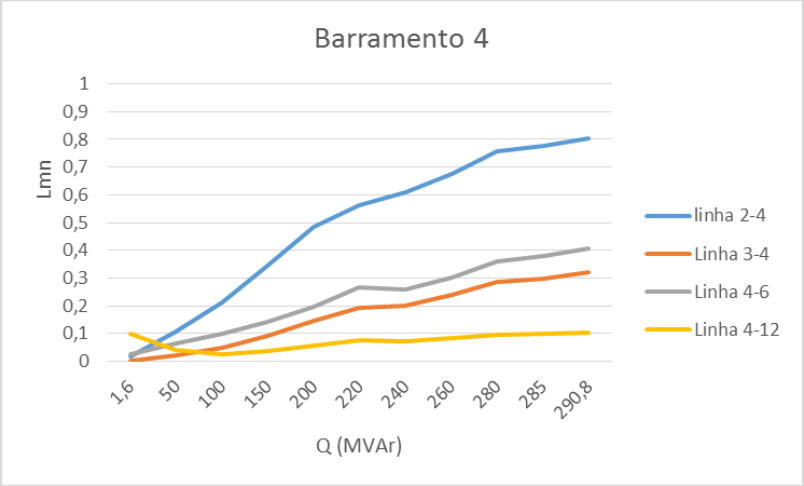


Figura 3.8 - Índice Lmn no barramento 4

A partir da análise da figura 3.8, referente ao barramento 4 conclui-se que a linha 2-4 é a linha crítica, pois apresenta o maior valor de Lmn. O valor do índice Lmn para a linha 2-4, para a potência reativa máxima é de 0.8049.

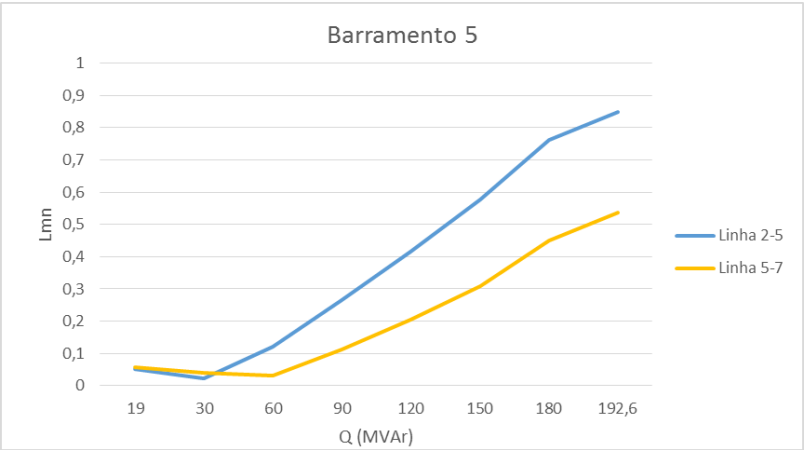


Figura 3.9 - Índice Lmn no barramento 5

A partir da análise da figura 3.9, referente ao barramento 5 conclui-se que a linha 2-5 é a linha crítica, pois apresenta o maior valor de Lmn. O valor do índice Lmn para a linha 2-5, para a potência reativa máxima é de 0.8484

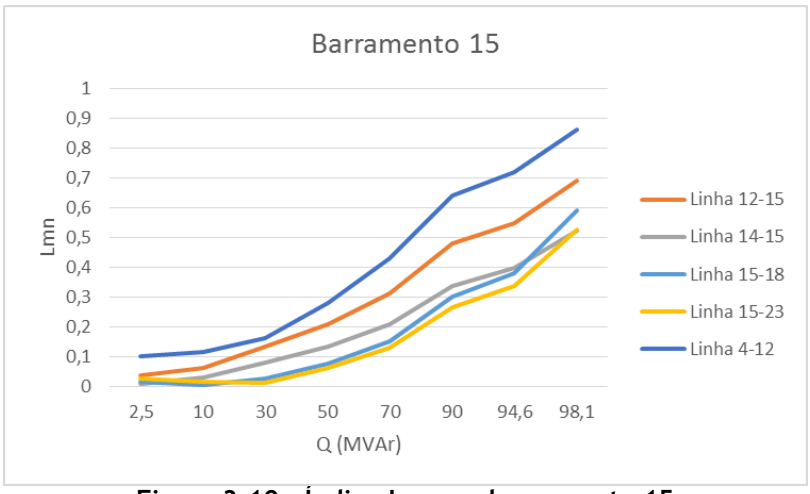


Figura 3.10 - Índice Lmn no barramento 15

A partir da análise da figura 3.10, referente ao barramento 15 conclui-se que a linha crítica que está diretamente ligada ao barramento é a linha 12-15. O valor do índice Lmn para a linha 12-15, para a potência reativa máxima é de 0.6901 e para a linha 4-12 é 0.8602.

Para além dessa linha com o aumento da potência da energia reativa no barramento 15 verifica-se que a linha 4-12 apresenta o maior valor do índice Lmn, sendo portanto esto ramo mais crítico do sistema.

Este ramo é constituído por um transformador e apresenta elevado valor de reactância, e o trânsito de potência reativa neste ramo é bastante elevado.

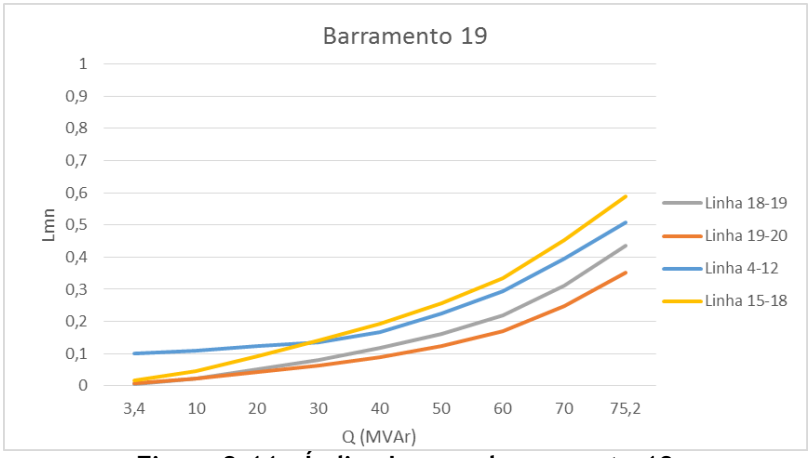


Figura 3.11 - Índice Lmn no barramento 19

A partir da análise da figura 3.11, referente ao barramento 19 conclui-se que a linha 15-18 é a linha crítica, pois apresenta o maior valor de Lmn, O valor do índice Lmn para a linha 18-19, para a potência reativa máxima é de 0.4354 e para a linha 15-18 é de 0.5883. Mesmo assim, nenhuma das linhas ligadas a este barramento apresentam um grande valor do índice

Lmn, assim sendo, as linhas deste barramento e este barramento não são críticos para a estabilidade de tensão do sistema.

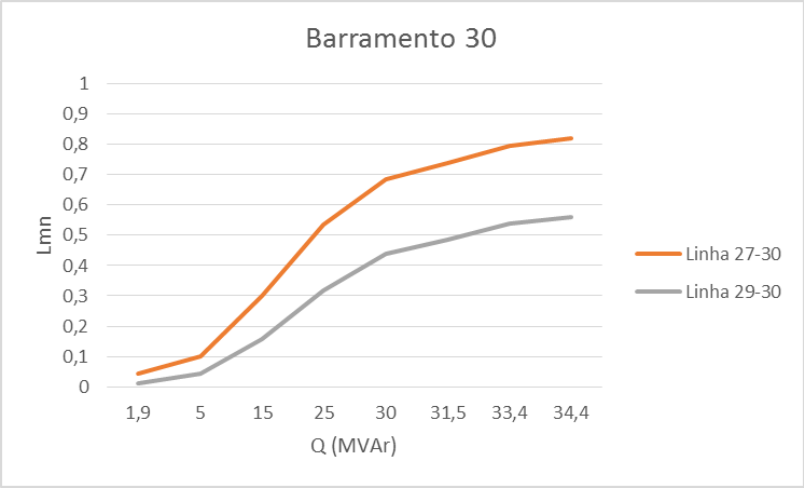


Figura 3.12 - Índice Lmn barramento 30

A partir da análise da figura 3.12, referente ao barramento 30 conclui-se que a linha 27-30 é a linha crítica, pois apresenta o maior valor de Lmn. O valor do índice Lmn para a linha 27-30 para a potência reativa máxima é de 0.8197.

Como seria de esperar, com o aumento da potência reativa nos barramentos, os níveis de tensão vão baixar, consequente o índice de estabilidade Lmn vai aumentado, aproximando-se de 1, o que indica a instabilidade de tensão.

3.2.2 Índice LQP

Para o estudo do índice de estabilidade de tensão LQP foram selecionados os mesmos barramentos que no índice Lmn. O método utilizado para o estudo deste índice é o mesmo, sendo a potência reativa destes barramentos incrementada até que a solução do trânsito de potências deixe de convergir. Foi registada a evolução dos índices.

Recorde-se a expressão do índice de LQP, apresentada anteriormente:

$$LQP_{ij} = 4\left(\frac{X}{{V_i}^2}\right)\left(\frac{X}{{V_i}^2}{P_i}^2 + Q_j\right) \tag{3.2}$$

Os gráficos das figuras 3.13 a 3.18 apresentam os resultados obtidos para o índice LQP. Em cada gráfico, a linha que apresentar o maior valor do índice de estabilidade de tensão, será a linha mais crítica do sistema.

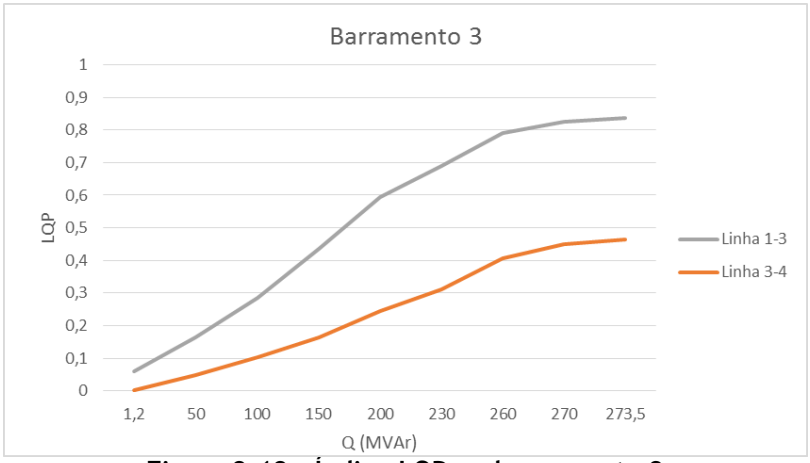


Figura 3.13 - Índice LQP no barramento 3

A partir da análise da figura 3.13, referente ao barramento 3 conclui-se que a linha 1-3 é a linha mais crítica, pois apresenta o maior valor de LQP. O valor do índice LQP para a linha 1-3, para a potência reativa máxima é de 0.8366.

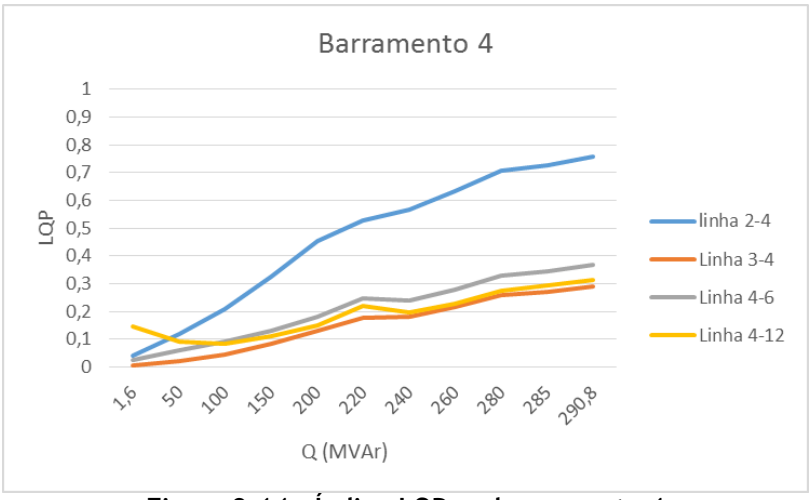


Figura 3.14 - Índice LQP no barramento 4

A partir da análise da figura 3.14, referente ao barramento 4, conclui-se que a linha 2-4 é a linha crítica, pois apresenta o maior valor de LQP. O valor do índice LQP para a linha 2-4, para a potência reativa máxima é de 0.7559.

Comparativamente com o índice Lmn, o índice LQP apresenta valores mais elevados, uma vez que considera a potência ativa presente na linha, o que se verifica principalmente no ramo 4-12.

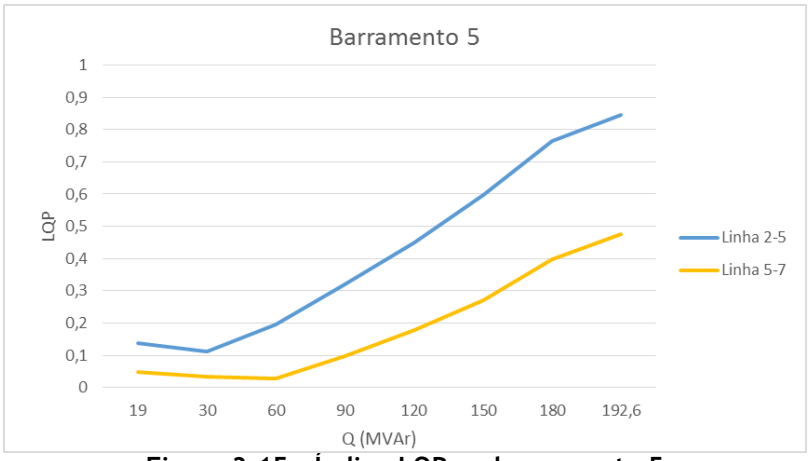


Figura 3.15 - Índice LQP no barramento 5

A partir da análise da figura 3.15, referente ao barramento 5, conclui-se que a linha 2-5 é a linha crítica, pois apresenta o maior valor de LQP. O valor do índice LQP para a linha 2-5, para a potência reativa máxima é de 0.8464.

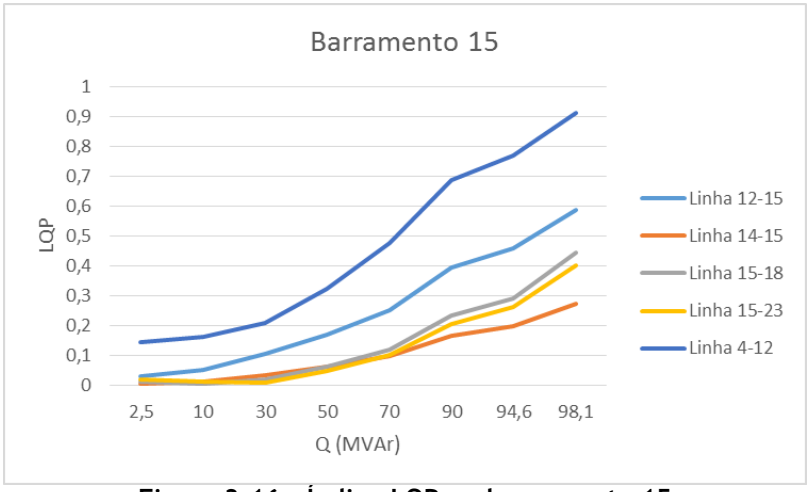


Figura 3.16 - Índice LQP no barramento 15

A partir da análise da figura 3.16, referente ao barramento 15, conclui-se, tal como no índice Lmn, que a linha que está diretamente ligada ao barramento mais crítica é a linha 12-15. O valor do índice LQP para a linha 12-15, para a potência reativa máxima é de 0.5875.

Para além dessa linha com o aumento da potência da energia reativa no barramento 15 verifica-se que a linha 4-12, apresenta o maior valor do índice LQP, sendo portanto esto ramo mais crítico do sistema. O valor do índice LQP para a linha 4-12, para a potência reativa máxima é de 0.9137.

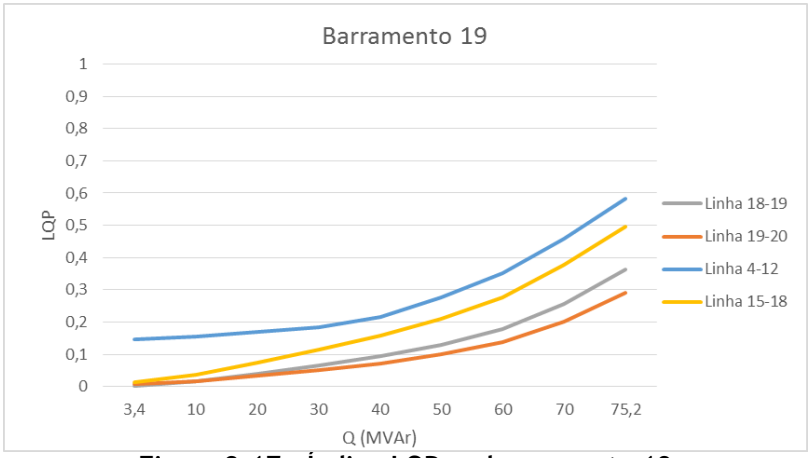


Figura 3.17 - Índice LQP no barramento 19

A partir da análise da figura 3.17, referente ao barramento 19, conclui-se que a linha 15-18 e a linha 4-12 são as linhas críticas, pois apresentam o maior valor de LQP. Mesmo assim, nenhuma das linhas apresenta um grande valor do índice LQP, pelo que as linhas deste barramento e este barramento, não são críticos para a estabilidade de tensão do sistema.

O valor do índice LQP para a linha 15-18, para a potência reativa máxima é de 0.4974 e para a linha 4-12 é de 0.5837.

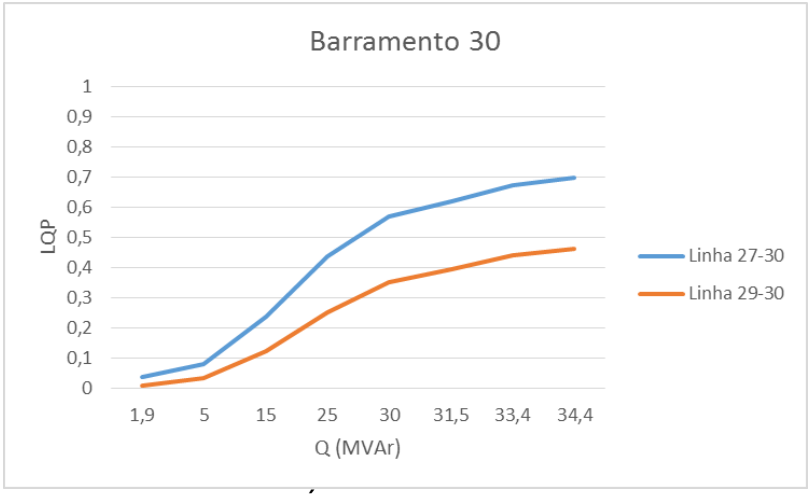


Figura 3.18 - Índice LQP no barramento 30

A partir da análise da figura 3.18, referente ao barramento 30 conclui-se que a linha 27-30 é a linha crítica, pois apresenta o maior valor de LQP. O valor do índice LQP para a linha 27-30, para a potência reativa máxima é de 0.6990.

Como seria de esperar, com o aumento da potência reativa nos barramentos, os níveis de tensão vão baixar, consequente o índice de estabilidade LQP vai aumentado, aproximando-se de 1, o que indica a instabilidade de tensão.

3.2.3 Índice FVSI

Para o estudo do índice de estabilidade de tensão FVSI foram selecionados os mesmos barramentos que nos índices anteriores. O método utilizado para o estudo deste índice consiste em aumentar a potência reativa de uma forma gradual, até que a solução do trânsito de potências deixe de convergir tendo sido registada a evolução dos índices.

Recorde-se que a expressão do índice de FVSI apresentada anteriormente:

$$FVSI = \frac{4{Z_{ij}}^2 Q_j}{{V_i}^2 X} \tag{3.3}$$

Os gráficos das figuras 3.19 a 3.24 representam os resultados obtidos para o índice FVSI. Em cada gráfico a linha que apresentar o maior valor do índice de estabilidade de tensão será a linha mais crítica do sistema.

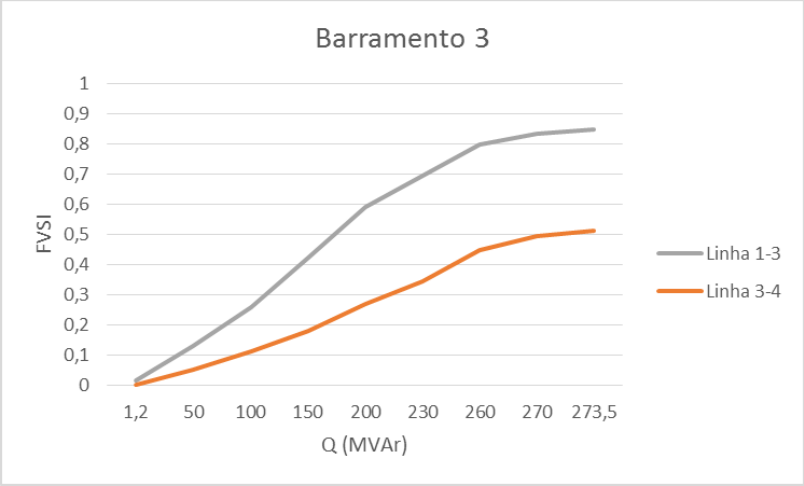


Figura 3.19 - Índice FVSI barramento 3

A partir da análise da figura 3.19, referente ao barramento 3, conclui-se que a linha 1-3 é a linha mais crítica, pois apresenta o maior valor de FVSI. O valor do índice FVSI para a linha 1-3, para a potência reativa máxima é de 0.8471.

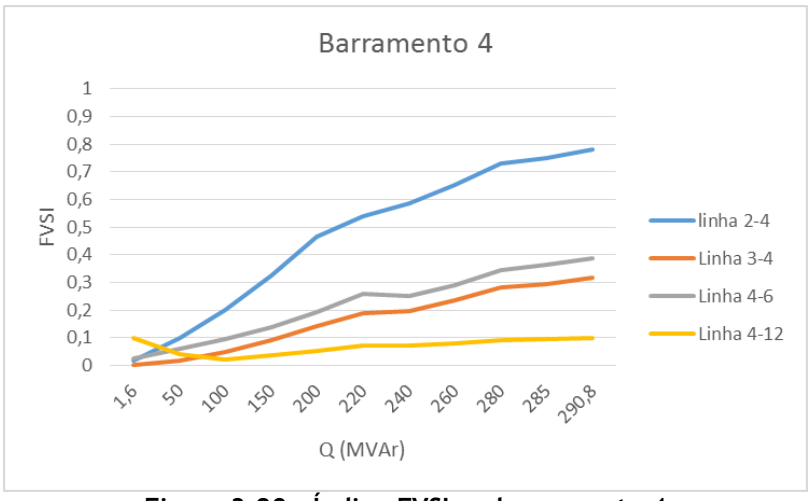


Figura 3.20 - Índice FVSI no barramento 4

A partir da análise da figura 3.20, referente ao barramento 4, conclui-se que a linha 2-4 é a linha crítica, pois apresenta o maior valor do índice FVSI. O valor do índice FVSI para a linha 2-4, para a potência reativa máxima é de 0.7559.

Comparativamente com o índice Lmn, o índice FVSI apresenta valores ligeiramente mais baixos, pois considera a impedância da linha.

Em relação ao índice LQP, o valor de FVSI é menor uma vez que não considera o trânsito da potência ativa.

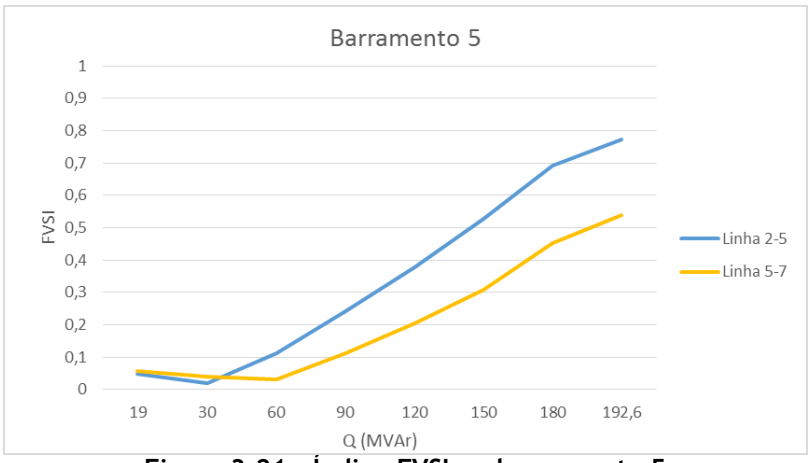


Figura 3.21 - Índice FVSI no barramento 5

A partir da análise da figura 3.21, referente ao barramento 5, conclui-se que a linha 2-5 é a linha crítica, pois apresenta o maior valor de FVSI. O valor do índice FVSI para a linha 2-5, para a potência reativa máxima, é de 0.7713.

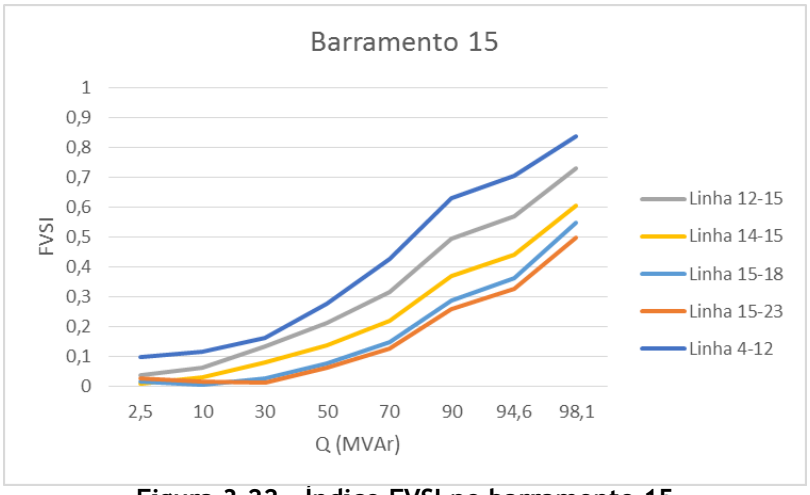


Figura 3.22 - Índice FVSI no barramento 15

A partir da análise da figura 3.22, referente ao barramento 15, conclui-se tal como nos índices apresentados até agora, que a linha que está diretamente ligada ao barramento mais crítica é a linha 12-15. O valor do índice FVSI para a linha 12-15, para a potência reativa máxima é de 0.7291.

Para este caso verifica-se que a linha 4-12, apresenta um valor mais elevado para o índice FVSI, sendo portanto esto ramo mais crítico do sistema, apesar de não estar diretamente ligada ao barramento 15. O valor do índice FVSI para a linha 4-12, para a potência reativa máxima, é de 0.8378.

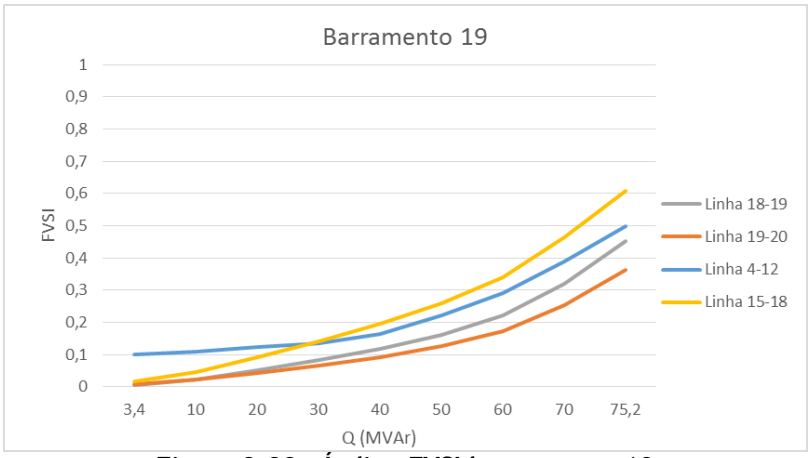


Figura 3.23 - Índice FVSI barramento 19

A partir da análise da figura 3.23, referente ao barramento 19 conclui-se que a linha 15-18 é a linha crítica, pois apresenta o maior valor de FVSI. O valor do índice FVSI para a linha 15-18, para a potência reativa máxima, é de 0.6092.

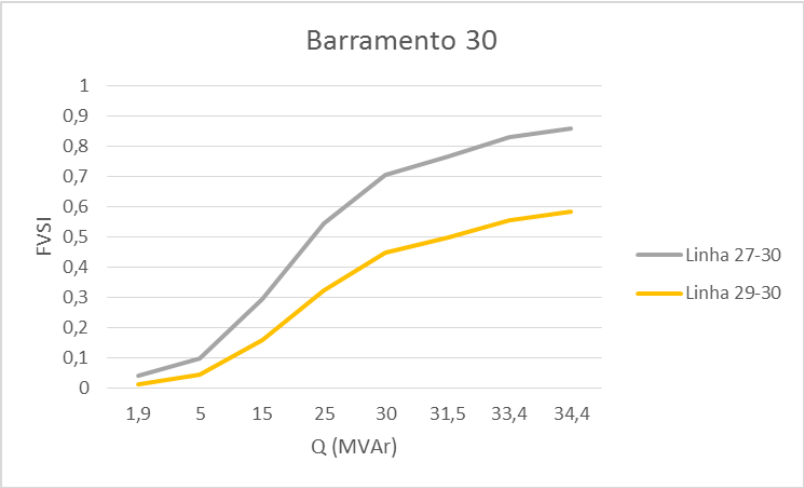


Figura 3.24 - Índice FVSI no barramento 30

A partir da análise da figura 3.24, referente ao barramento 30, conclui-se que a linha 27-30 é a linha crítica, pois apresenta o maior valor do índice FVSI. O valor do índice FVSI, para a linha 27-30, para a potência reativa máxima é de 0.8578.

Como seria de esperar, com o aumento da potência reativa nos barramentos, os níveis de tensão vão baixar, consequentemente o índice de estabilidade FVSI vai aumentando, aproximando-se de 1, o que indica a proximidade de instabilidade de tensão.

3.2.4 Índice LCPI

Para o estudo do índice de estabilidade de tensão LCPI, os barramentos utilizados são os mesmos que nos índices de estabilidade de tensão anteriores. O método utilizado para o estudo deste índice é o mesmo, isto é, a potência reativa destes barramentos é incrementada até que a solução do trânsito de potências deixe de convergir, sendo registada a evolução dos índices.

Recorde-se a expressão do índice de LCPI, apresentada anteriormente:

$$LCPI = \frac{4Acos\alpha\left(P_i Bcos\beta + Q_j sen\beta\right)}{(V_i cos\delta)^2} \qquad (3.4)$$

Os gráficos das figuras 3.25 a 3.30 apresentam os resultados obtidos para o índice LCPI. Em cada gráfico a linha que apresentar o maior valor do índice de estabilidade de tensão será a linha mais crítica do sistema.

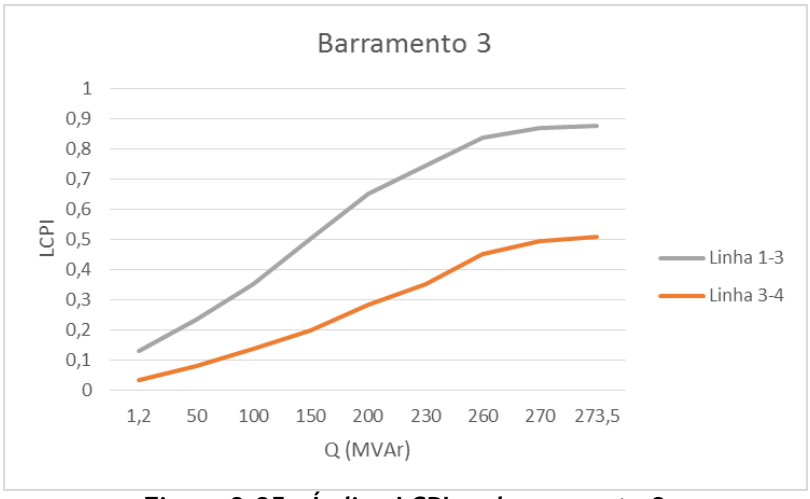


Figura 3.25 - Índice LCPI no barramento 3

A partir da análise da figura 3.25, referente ao barramento 3, conclui-se que a linha 1-3 é a linha mais instável, pois apresenta o maior valor de LCPI. O valor do índice LCPI para a linha 1-3, para a potência reativa máxima é de 0.8779.

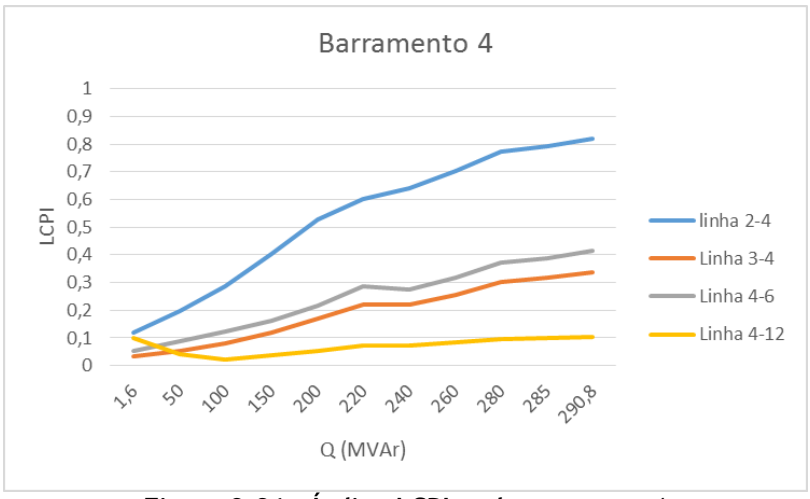


Figura 3.26 - Índice LCPI no barramento 4

A partir da análise da figura 3.26, referente ao barramento 4, conclui-se que a linha 2-4 é a linha crítica, pois apresenta o maior valor do índice LCPI. O valor do índice LCPI para a linha 2-4, para a potência reativa máxima, é de 0.8049.

Comparativamente com o índice LQP, o índice LCPI apresenta valores ligeiramente maiores em algumas linhas, pois este considera a susceptância da linha, como se verifica principalmente nas linhas 2-4, 3-4 e 4-6.

Em relação aos índices Lmn e FVSI, o índice LCPI é maior, pois considera o trânsito da potência ativa.

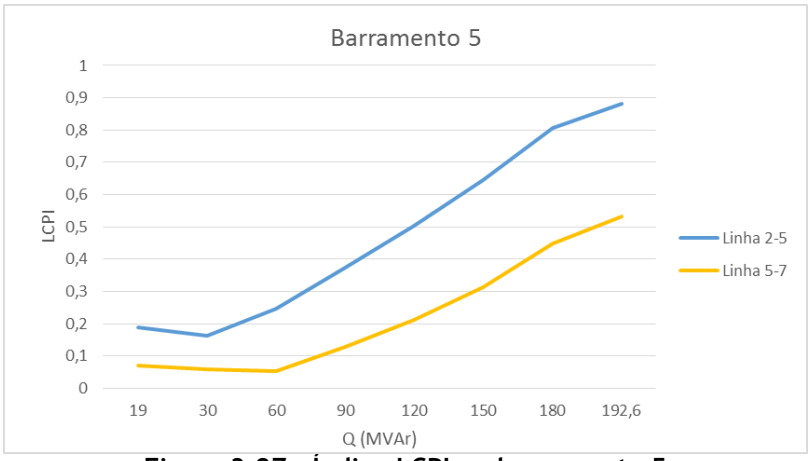


Figura 3.27 - Índice LCPI no barramento 5

A partir da análise da figura 3.27, referente ao barramento 5 conclui-se que a linha 2-5 é a linha crítica, pois apresenta o maior valor de LCPI. O valor do índice LCPI para a linha 2-5, para a potência reativa máxima é de 0.8813.

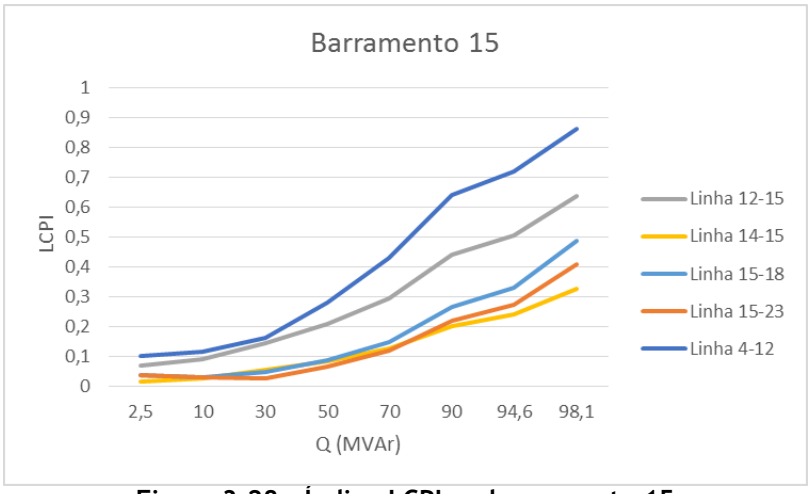


Figura 3.28 - Índice LCPI no barramento 15

A partir da análise da figura 3.28, referente ao barramento 15, conclui-se, tal como até agora, que a linha crítica que está diretamente ligada ao barramento é a linha 12-15. O valor do índice LCPI, para a linha 1-3, para a potência reativa máxima, é de 0.6363.

Para este caso verifica-se que a linha 4-12 apresenta um maior valor do índice LCPI, sendo portanto este ramo mais crítico do sistema, apesar de não estar diretamente ligada ao barramento 15. O valor do índice LCPI para a linha 4-12, para a potência reativa máxima é de 0.8602.

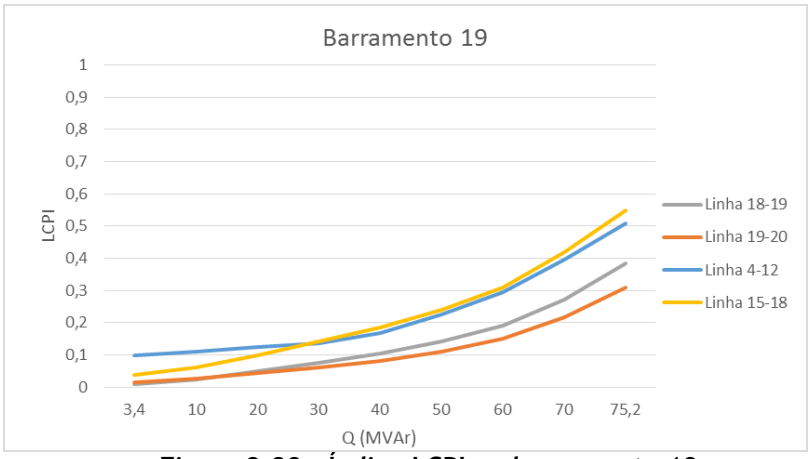


Figura 3.29 - Índice LCPI no barramento 19

A partir da análise da figura 3.29, referente ao barramento 19 conclui-se que a linha 15-18 é a linha crítica, pois apresenta o maior valor de LCPI. O valor do índice LCPI para a linha 15-18, para a potência reativa máxima, é de 0.5491.

Apesar disso, as linhas ligadas a este barramento não afetam a estabilidade do sistema pois não atingem valores perto da unidade.

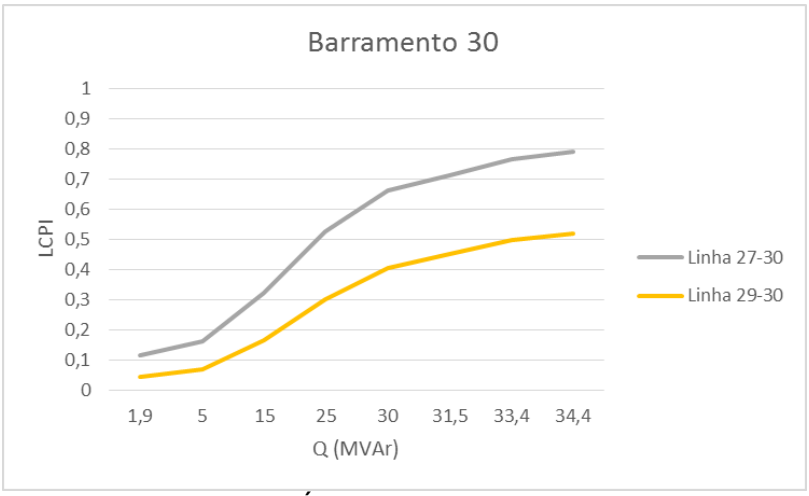


Figura 3.30 - Índice LCPI no barramento 30

A partir da análise da figura 3.30, referente ao barramento 30 conclui-se que a linha 27-30 é a linha crítica, pois apresenta o maior valor do índice LCPI. O valor do índice LCPI para a linha 27-30, para a potência reativa máxima, é de 0.7885.

Como seria de esperar, com o aumento da potência reativa nos barramentos, os níveis de tensão vão baixar, consequente o índice de estabilidade LCPI vai aumentado, aproximando-se de 1, o que indica a proximidade do sistema à instabilidade de tensão.

Com os resultados obtidos é possível concluir que os índices de estabilidade de tensão calculados apresentam coerência entre si, verificando-se que as linhas mais críticas identificadas, foram sempre as mesmas.

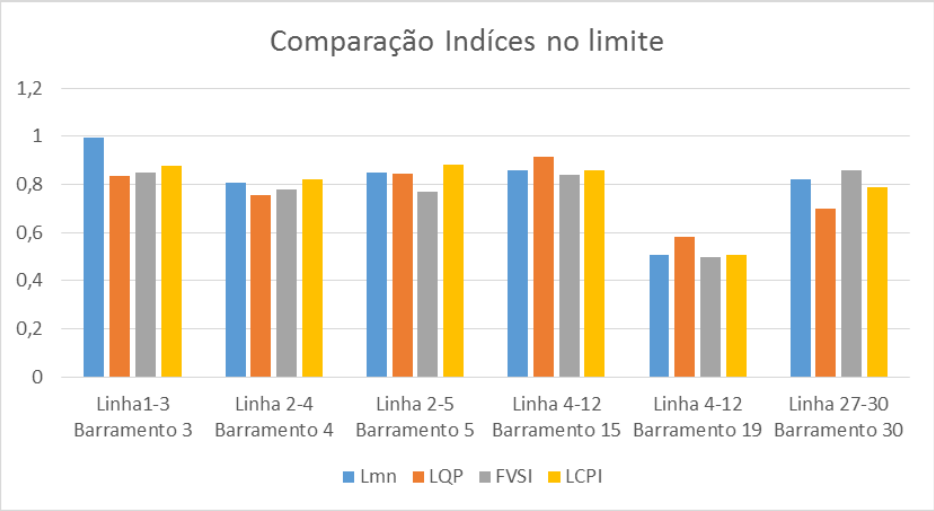


Figura 3.31 - Comparação entre os índices no limite

A partir da figura 3.31 é possível verificar os valores dos índices no limite, para a linha mais crítica em cada um dos barramentos para a variação da potência reativa em cada um dos barramentos.

O estudo dos índices de tensão através do aumento da potência reativa consumida, mostra uma boa performance dos índices estudados.

A partir dos resultados obtidos também se conclui quais são as linhas de um dado barramento que põem em causa a estabilidade de tensão. A linha que apresenta maiores valores dos índices é a linha 1-3, no caso do aumento da carga no barramento 3; a linha 2-5 no caso do aumento da carga no barramento5 e a linha 4-12, quando se aumenta a carga no barramento 15.

De seguida, os índices de estabilidade de tensão, serão estudados, mas o critério será o aumento da potência ativa consumida, num barramento mantendo as restantes cargas do sistema constantes.

3.3 Variação da potência ativa de carga num barramento

Para analisar os índices de estabilidade de tensão por alteração da potência ativa consumida num barramento foi utilizada novamente a rede teste IEEE de 30 barramentos. O procedimento seguido é semelhante ao da análise feita na secção 3.2, mas agora aumenta-se a potência ativa em vez da potência reativa.

Para efetuar esta análise partiu-se do caso base apresentado anteriormente, tendo-se realizado os seguintes passos:

- Aumentar gradualmente a potência ativa apenas num barramento, até que a solução do trânsito de potências deixe de convergir ou se atinja a proximidade do ponto de colapso de tensão;
- Calcular o valor do índice em estudo para o valor de potência ativa (P).
- Obter o gráfico do índice em estudo (Lmn, LQP, FVSI, LCPI) em função da potência ativa (P);
- Determinar qual a linha do sistema que apresenta maiores valores dos índices de forma a identificar as linhas mais críticas.

Estes passos foram realizados para os barramentos 3, 5, 15 e 30 do sistema e para todos os índices apresentados no Capítulo 2, secção 2.5 e são apresentados de seguida.

3.3.1 Índice Lmn

Os gráficos das figuras 3.32 a 3.35 apresentam os resultados obtidos para o índice Lmn. Em cada gráfico a linha que apresentar o maior valor do índice de estabilidade de tensão será a linha mais crítica do sistema.

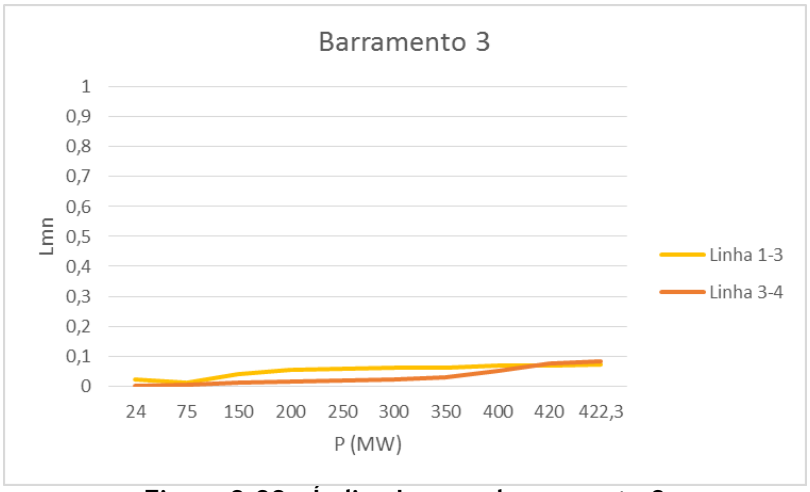


Figura 3.32 - Índice Lmn no barramento 3

A partir da análise da figura 3.32, referente ao barramento 3, conclui-se que as linhas 1-3 é 3-4 têm valores muito próximos, e muito baixos, pois o índice Lmn não considera a potência ativa presente nas linhas.

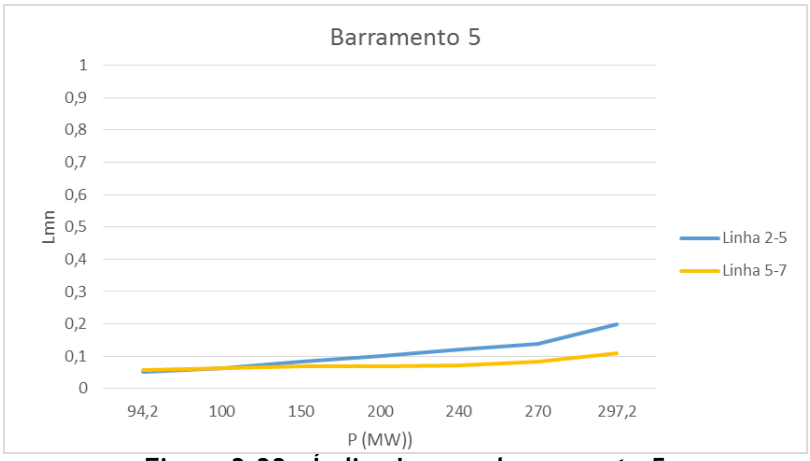


Figura 3.33 - Índice Lmn no barramento 5

A partir da análise da figura 3.33, referente ao barramento 5, conclui-se que a linha 2-5 é a linha crítica, pois apresenta o maior valor de Lmn, apesar de apresentar um valor muito baixo do índice Lmn. O valor do índice Lmn para a linha 2-5, para a potência ativa máxima é de 0.1976.

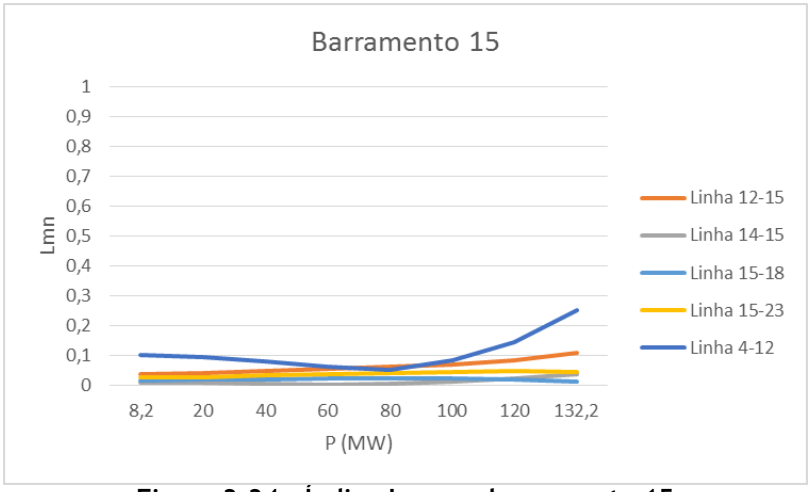


Figura 3.34 - Índice Lmn no barramento 15

A partir da análise da figura 3.34, referente ao barramento 15, conclui-se que a linha crítica que está diretamente ligada ao barramento é a linha 12-15. A linha 4-12, apresenta o maior valor do índice Lmn, sendo portanto este o ramo mais crítico do sistema, quando se aumenta a potência ativa no barramento 15. O valor do índice Lmn para a linha 4-12, para a potência ativa máxima, é de 0.2523.

Este ramo é constituído por um transformador e apresenta elevado valor de reactância, logo apresenta um valor do índice Lmn mais elevado.

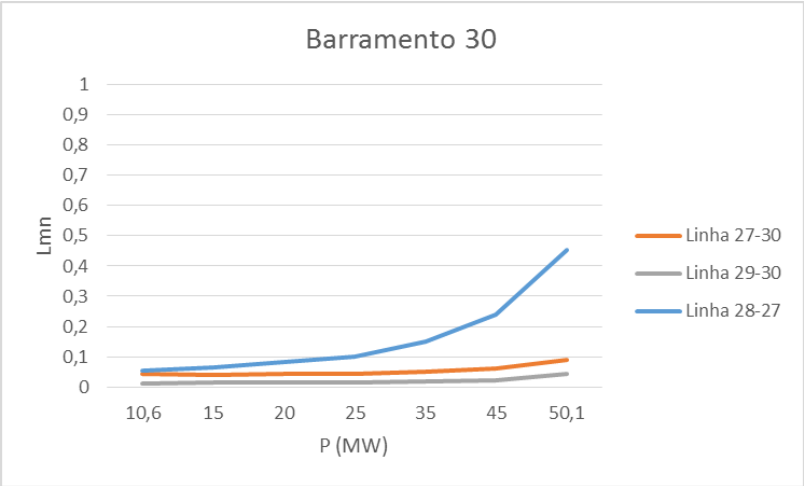


Figura 3.35 - Índice Lmn no barramento 30

A partir da análise da figura 3.35, referente ao barramento 30, conclui-se que a linha 27-30 é a linha crítica, ligada diretamente ao barramento 3.

Tal como se verificou no barramento 15, o ramo 28-27 que é um transformador, apresenta um valor do índice Lmn elevado. O valor do índice Lmn para a linha 28-27, para a potência ativa máxima é de 0.4530.

Na análise da estabilidade de tensão do sistema por variação de potência ativa consumida nos barramentos o índice Lmn, não apresenta resultados muito relevantes. Assim, pode-se considerar que o índice de estabilidade Lmn, não apresenta uma performance favorável nesta análise.

3.3.2 Índice LQP

Para o estudo do índice de estabilidade de tensão LQP foram selecionados os mesmos barramentos que no índice Lmn.

Os gráficos apresentados nas figuras 3.36 a 3.39 apresentam os resultados obtidos para o índice LQP. Em cada gráfico a linha que apresentar o maior valor do índice de estabilidade de tensão será a linha mais crítica do sistema.

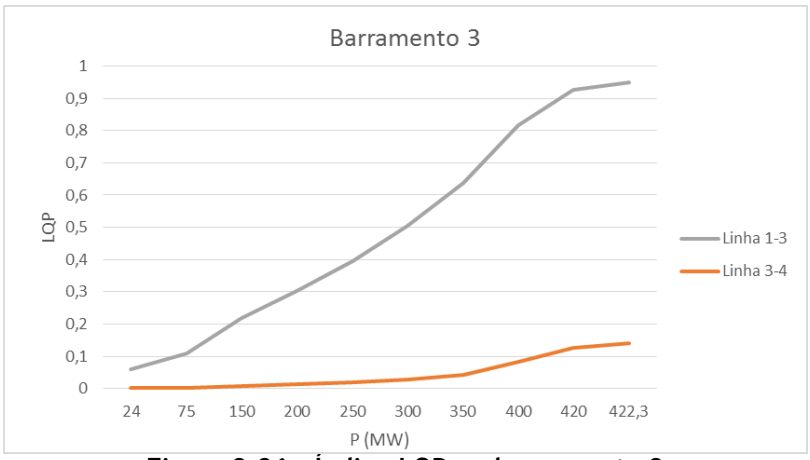


Figura 3.36 - Índice LQP no barramento 3

A partir da análise da figura 3.36, referente ao barramento 3, conclui-se que a linha 1-3 é a linha mais crítica, pois apresenta o maior valor de LQP. O valor do índice LQP para a linha 1-3, para a potência ativa máxima é de 0.9486.

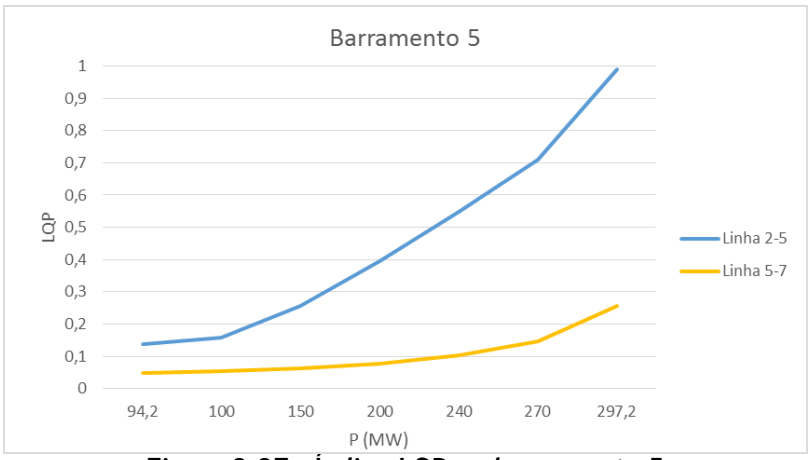


Figura 3.37 - Índice LQP no barramento 5

A partir da análise da figura 3.37, referente ao barramento 5, conclui-se que a linha 2-5 é a linha crítica, pois apresenta o maior valor de LQP. O valor do índice LQP para a linha 2-5, para a potência ativa máxima é de 0.9888.

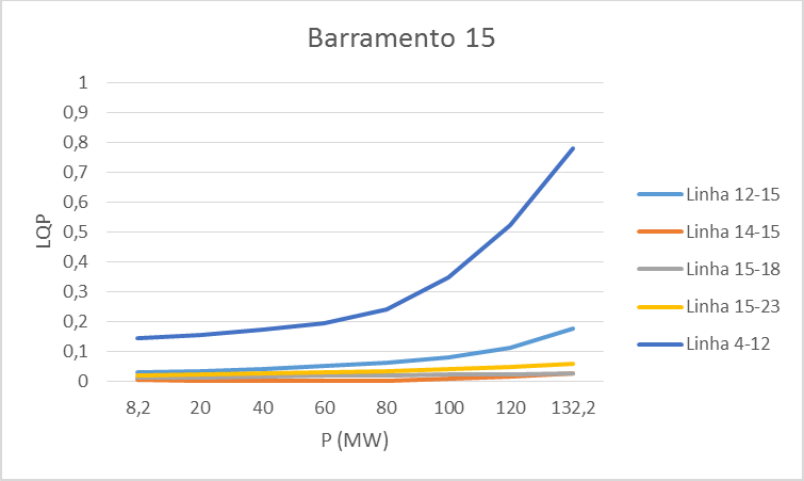


Figura 3.38 - Índice LQP no barramento 15

A partir da análise da figura 3.38, referente ao barramento 15, conclui-se que a linha que está diretamente ligada ao barramento mais crítica, é a linha 12-15. O valor do índice LQP para a linha 12-15, para a potência ativa máxima é de 0.1778.

Para além dessa linha com o aumento da potência ativa no barramento 15, verifica-se que a linha 4-12, apresenta o maior valor do índice LQP, sendo portanto este o ramo mais crítico do sistema. O valor do índice LQP para a linha 4-12, para a potência ativa máxima é de 0.7821.

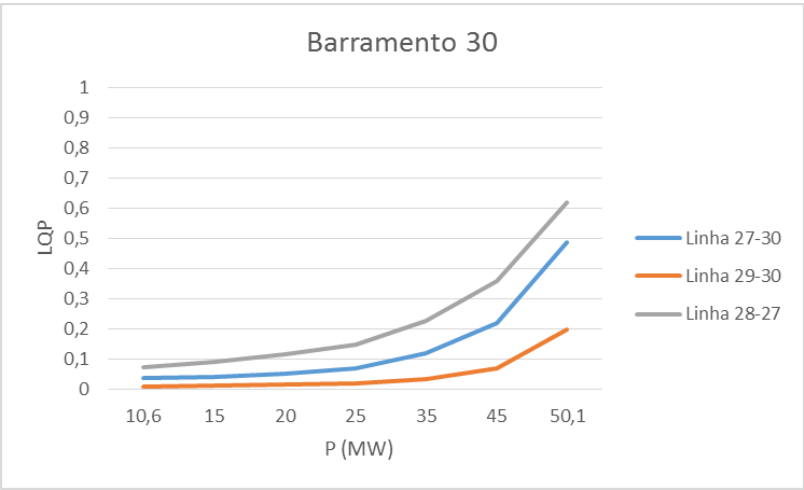


Figura 3.39 - Índice LQP no barramento 30

A partir da análise da figura 3.39, referente ao barramento 30, conclui-se que a linha 27-30 é a linha crítica ligada diretamente ao barramento 30, pois apresenta o maior valor de LQP. O valor do índice LQP para a linha 27-30, para a potência ativa máxima é de 0.4883.

Com o aumento da potência ativa no barramento 30, o índice LQP apresenta na linha 28-27, um valor de 0.6213, que é superior à linha 27-30, o que faz com que esta linha seja a linha mais critica, apesar de não estar ligada diretamente ao barramento 30.

Como seria de esperar, com o aumento da potência ativa nos barramentos e uma vez que o índice LQP considera a potência ativa para determinar a estabilidade de tensão do sistema, os resultados comparativamente com o estudo por alteração da potência ativa nas cargas foram coerentes.

3.3.3 Índice FVSI

Para o estudo do índice de estabilidade de tensão FVSI foram selecionados os mesmos barramentos que nos índices anteriores. O método utilizado para o estudo deste índice é o mesmo, sendo a potência ativa destes barramentos incrementada até que a solução do trânsito de potências deixe de convergir, tendo-se registado a evolução dos índices.

Os gráficos das figuras 3.40 a 3.43 apresentam os resultados obtidos para o índice FVSI. Em cada gráfico a linha que apresentar o maior valor do índice de estabilidade de tensão será a linha mais crítica do sistema.

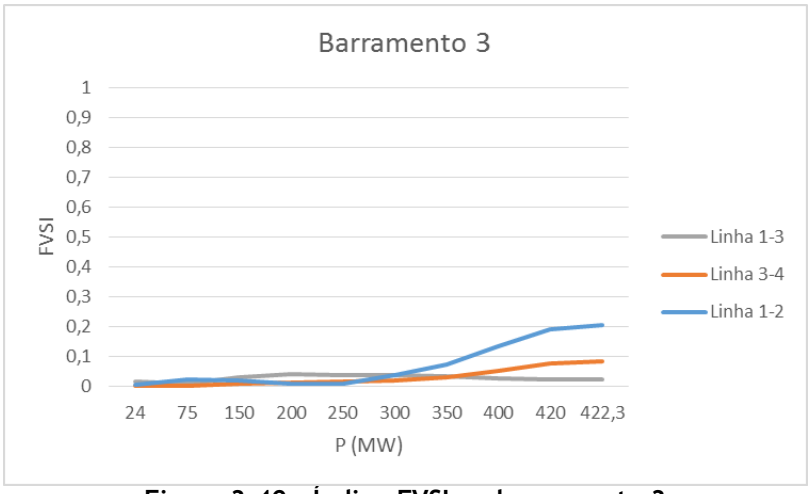


Figura 3.40 - Índice FVSI no barramento 3

A partir da análise da figura 3.40, referente ao barramento 3 conclui-se que a linha 1-2 é a linha mais crítica, pois apresenta o maior valor de FVSI. O valor do índice FVSI para a linha 1-2, para a potência ativa máxima, é de 0.2269.

O mesmo não se verificou quando se alterou a potência reativa no barramento 3, o que mostra que o índice FVSI não apresenta uma boa performance, quando se altera a potência ativa nos barramentos, uma vez que esta não é considerada no cálculo do índice.

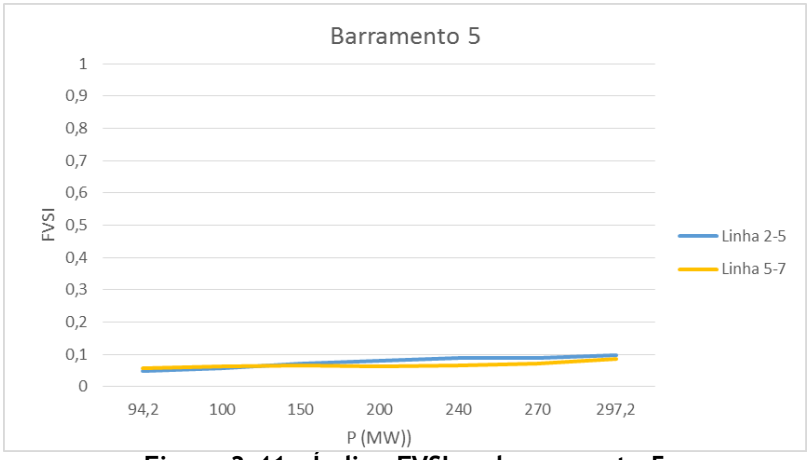


Figura 3.41 - Índice FVSI no barramento 5

A partir da análise da figura 3.41, referente ao barramento 5, conclui-se que a linha 2-5 é a linha mais crítica, mas a informação retirada deste índice não é muito fiável uma vez que apresenta um valor muito baixo com o aumento da potência ativa.

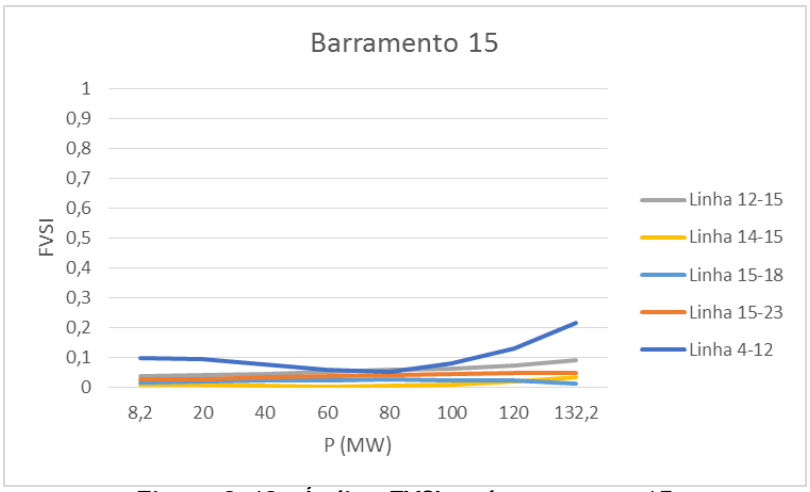


Figura 3.42 - Índice FVSI no barramento 15

A partir da análise da figura 3.42, referente ao barramento 15, conclui-se, tal como nos índices apresentados até agora, que a linha que está diretamente ligada ao barramento mais crítica é a linha 12-15. Para este caso verifica-se que a linha 4-12, apresenta um maior valor do índice FVSI, sendo portanto esto ramo mais crítico do sistema, apesar de não estar

diretamente ligada ao barramento 15. O valor do índice FVSI para a linha 4-12, para a potência ativa máxima é de 0.2170.

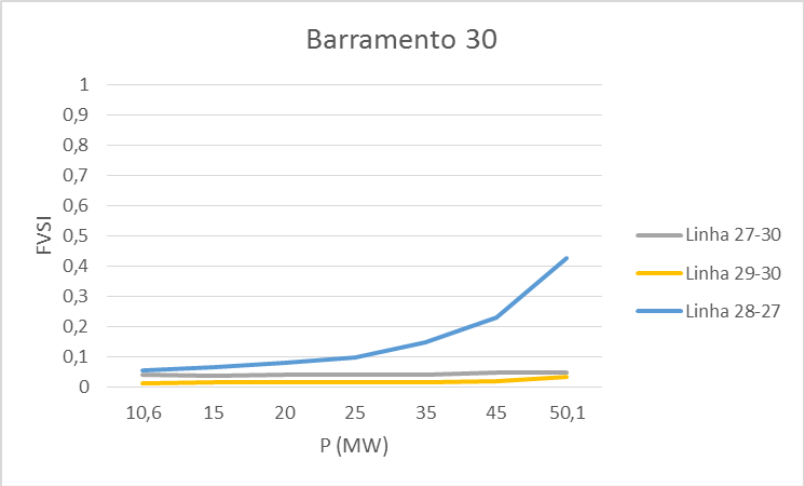


Figura 3.43 - Índice FVSI no barramento 30

A partir da análise da figura 3.43, referente ao barramento 30, conclui-se que a linha 27-30 apresenta um maior valor do índice FVSI mas, tal como nos barramentos anteriores, é um valor muito baixo.

Tal como no barramento 15, o ramo 28-27, que é constituído por um transformador que apresenta um valor elevado de impedância, tem um valor elevado do índice FVSI de 0.4263, para a potência ativa máxima.

3.3.4 Índice LCPI

Para o estudo do índice de estabilidade de tensão LCPI, os barramentos utilizados são os mesmos que nos índices de estabilidade de tensão anteriores. O método utilizado para o estudo deste índice é o mesmo, sendo a potência ativa destes barramentos incrementada até que a solução do trânsito de potências deixe de convergir, tendo-se registado a evolução dos índices.

Os gráficos das figuras 3.44 a 3.47 apresentam os resultados obtidos para o índice LCPI. Em cada gráfico a linha que apresentar o maior valor do índice de estabilidade de tensão será a linha mais crítica do sistema.

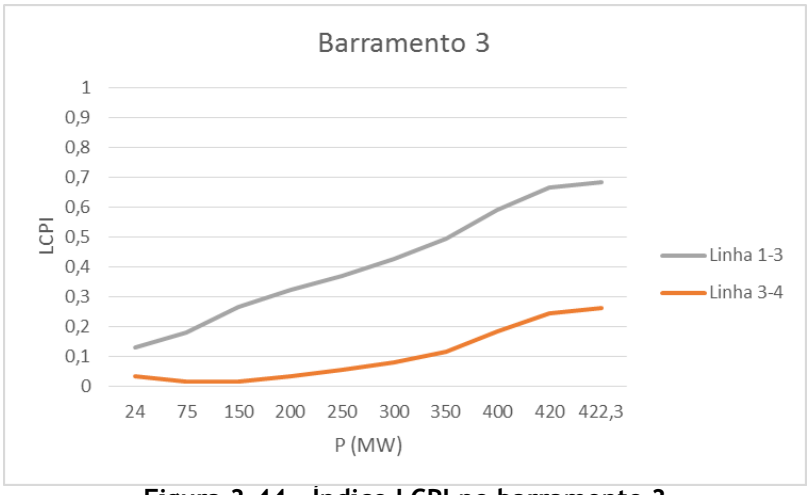


Figura 3.44 - Índice LCPI no barramento 3

A partir da análise da figura 3.44, referente ao barramento 3 conclui-se que a linha 1-3 é a linha mais crítica, pois apresenta o maior valor de LCPI. O valor do índice LCPI para a linha 1-3, para a potência ativa máxima é de 0.6826.

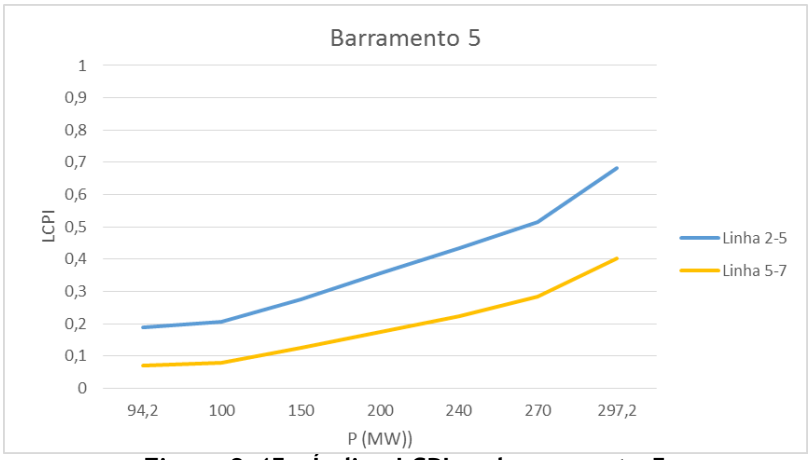


Figura 3.45 - Índice LCPI no barramento 5

A partir da análise da figura 3.45, referente ao barramento 5, conclui-se que a linha 2-5 é a linha crítica, pois apresenta o maior valor de LCPI. O valor do índice LCPI para a linha 2-5, para a potência ativa máxima é de 0.6821.

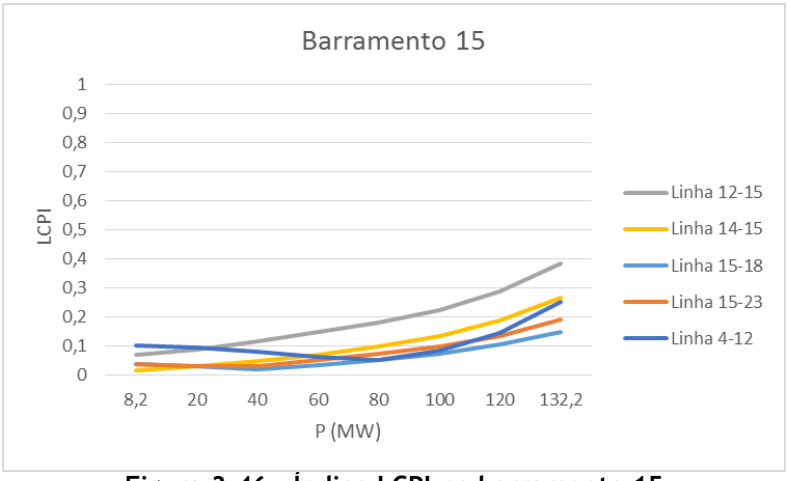


Figura 3.46 - Índice LCPI no barramento 15

A partir da análise da figura 3.46, referente ao barramento 15, conclui-se, tal como até agora, que a linha crítica que está diretamente ligada ao barramento é a linha 12-15. O valor do índice LCPI para a linha 12-15, para a potência ativa máxima é de 0.3821.

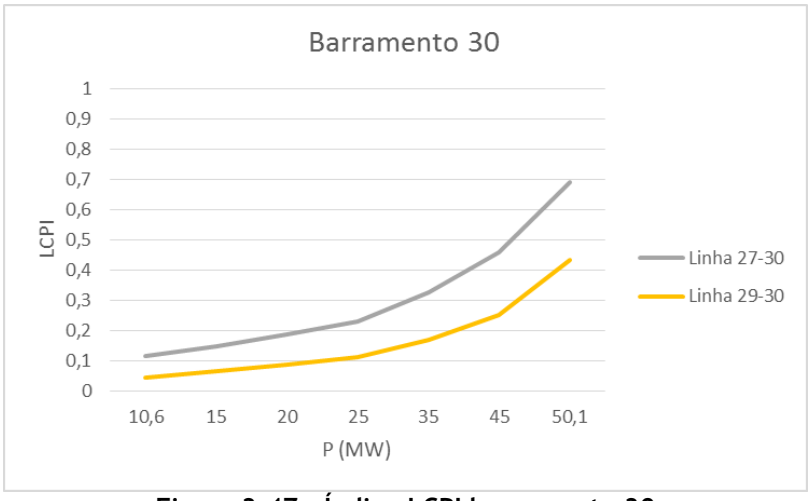


Figura 3.47 - Índice LCPI barramento 30

A partir da análise da figura 3.47, referente ao barramento 30, conclui-se que a linha 27-30 é a linha crítica, pois apresenta o maior valor do índice LCPI. O valor do índice LCPI para a linha 27-30, para a potência ativa máxima é de 0.6900.

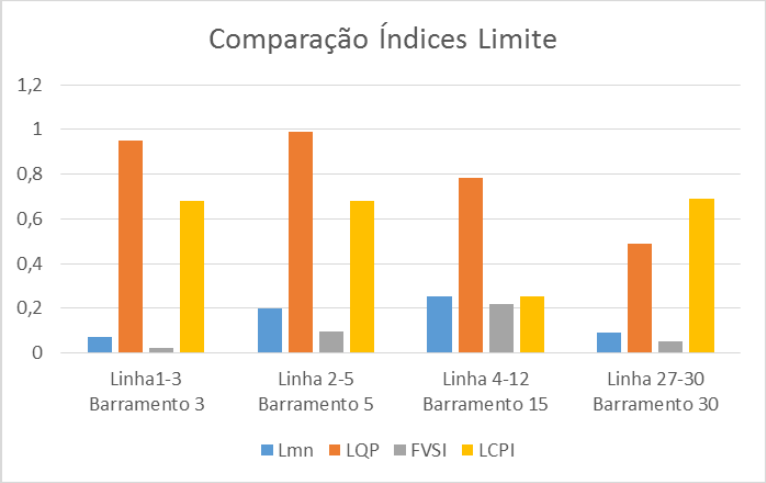


Figura 3.48 - Comparação dos índices no limite

A partir da figura 3.48 é possível verificar os valores dos índices no limite, para a linha mais crítica em cada um dos barramentos para a variação da potência ativa em cada um dos barramentos.

Com os resultados obtidos, é possível concluir que os índices de estabilidade de tensão LQP e LCPI apresentam coerência entre si e com o estudo anterior, em que se variou a potência reativa nos barramentos.

Os resultados obtidos para os índices Lmn e FVSI quando se varia a energia ativa não apresentam resultados relevantes, pois estes não consideram o trânsito de potência ativa nas linhas. Assim sendo, estes índices não se mostram eficazes na determinação da estabilidade de tensão quando se varia a potencia ativa

De seguida, nos índices de estabilidade de tensão estudados o critério será o aumento gradual da potência reativa de todas as cargas do sistema.

3.4 Variação da potência reativa de carga no sistema

Para analisar os índices de estabilidade de tensão por alteração da potência reativa consumida em todos os barramentos do sistema, foi novamente utilizada a rede teste IEEE de 30 barramentos.

Para efetuar esta análise partiu-se do caso base apresentado na secção 3.1, tendo-se realizado os seguintes passos:

- Aumentar gradualmente a potência reativa em todos os barramentos, até que a solução do trânsito de potências deixe de convergir, ou se atinja a proximidade do ponto de colapso de tensão;
- Calcular o valor do índice em estudo para o valor de potência reativa (Q).

- Obter o gráfico do índice em estudo (Lmn, LQP, FVSI, LCPI), para o limite de convergência do trânsito de potências;

- Determinar qual a linha do sistema que apresenta maiores valores dos índices de forma a identificar as linhas mais críticas.

O resultado para o trânsito de potências para o carregamento máximo do sistema pode ser consultado no anexo B.

Estes passos foram realizados para todos os barramentos do sistema e para todos os índices apresentados no Capítulo 2, secção 2.5 e são apresentados de seguida.

Os incrementos da Potencia consumida são mostrados na tabela 3.1.

Tabela 3.1 Incrementos das potências reativas nos barramentos da rede teste IEEE de 30 barramentos

Barramento	Mvar	+30%	+60%	+100%	+120%	+150%	+175%	+200%	+220%	+230%
2	12,7	16,51	20,32	25,4	27,94	31,75	34,925	38,1	40,64	41,91
3	1,2	1,56	1,92	2,4	2,64	3	3,3	3,6	3,84	3,96
4	1,6	2,08	2,56	3,2	3,52	4	4,4	4,8	5,12	5,28
5	20	26	32	40	44	50	55	60	64	66
7	10,9	14,17	17,44	21,8	23,98	27,25	29,975	32,7	34,88	35,97
8	30	39	48	60	66	75	82,5	90	96	99
10	2	2,6	3,2	4	4,4	5	5,5	6	6,4	6,6
12	7,5	9,75	12	15	16,5	18,75	20,625	22,5	24	24,75
14	1,6	2,08	2,56	3,2	3,52	4	4,4	4,8	5,12	5,28
15	2,5	3,25	4	5	5,5	6,25	6,875	7,5	8	8,25
16	1,8	2,34	2,88	3,6	3,96	4,5	4,95	5,4	5,76	5,94
17	5,8	7,54	9,28	11,6	12,76	14,5	15,95	17,4	18,56	19,14
18	0,9	1,17	1,44	1,8	1,98	2,25	2,475	2,7	2,88	2,97
19	3,4	4,42	5,44	6,8	7,48	8,5	9,35	10,2	10,88	11,22
20	0,7	0,91	1,12	1,4	1,54	1,75	1,925	2,1	2,24	2,31
21	11,2	14,56	17,92	22,4	24,64	28	30,8	33,6	35,84	36,96
23	1,6	2,08	2,56	3,2	3,52	4	4,4	4,8	5,12	5,28
24	6,7	8,71	10,72	13,4	14,74	16,75	18,425	20,1	21,44	22,11
26	2,3	2,99	3,68	4,6	5,06	5,75	6,325	6,9	7,36	7,59
29	0,9	1,17	1,44	1,8	1,98	2,25	2,475	2,7	2,88	2,97
30	1,9	2,47	3,04	3,8	4,18	4,75	5,225	5,7	6,08	6,27

3.4.1 Índice Lmn

Os gráficos das figuras 3.49 e 3.50 apresentam os resultados obtidos para o índice Lmn no ponto máximo de potência reativa de carga, ou seja, +230% em todos os barramentos da rede. Em cada gráfico a linha que apresentar o maior valor do índice de estabilidade de tensão será a linha mais crítica do sistema.

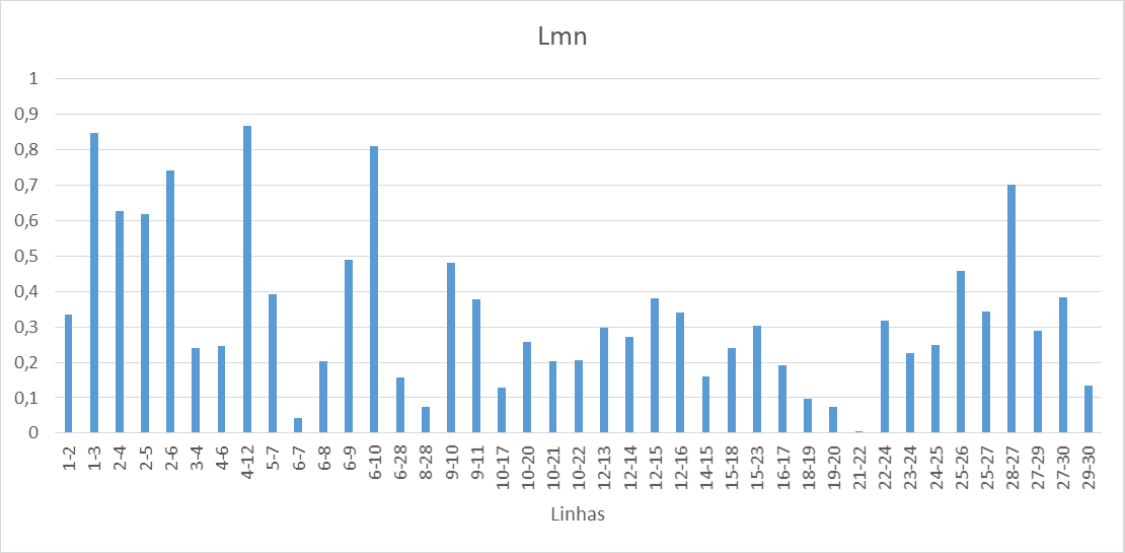


Figura 3.49 - Índice Lmn para a potência máxima reativa do sistema

A partir da análise da figura 3.49, quando se varia a potência reativa consumida em todo o sistema, as linhas mais instáveis são a linha 1-3, a linha 2-6 e as linhas 4-12, 6-10 e 28-27 que correspondem a transformadores do sistema. Os valores do índice Lmn para as linhas 1-3 é 0.8481, 2-6 é 0.740, 6-10 é 0.8107, 4-12 é 0.8657 e 28-27 é 0.6997.

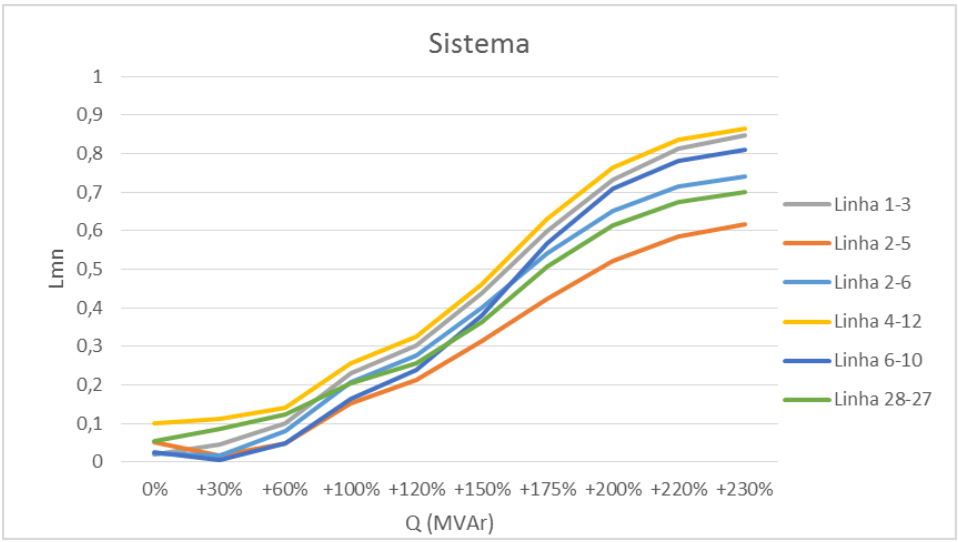


Figura 3.50 - Evolução do índice Lmn com o aumento da potência reativa do sistema

Na figura 3.50 é possível verificar a evolução dos índices ao longo dos incrementos de potência reativa para o índice Lmn e é possível verificar que os resultados obtidos são os esperados uma vez que quanto maior a energia reativa das cargas, o valor do índice aproxima-se de 1.

3.4.2 Índice LQP

Os gráficos das figuras 3.51 a 3.52 apresentam os resultados obtidos para o índice LQP no ponto máximo de potência reativa de carga, ou seja, +230% em todos os barramentos da rede. Em cada gráfico a linha que apresentar o maior valor do índice de estabilidade de tensão será a linha mais crítica do sistema.

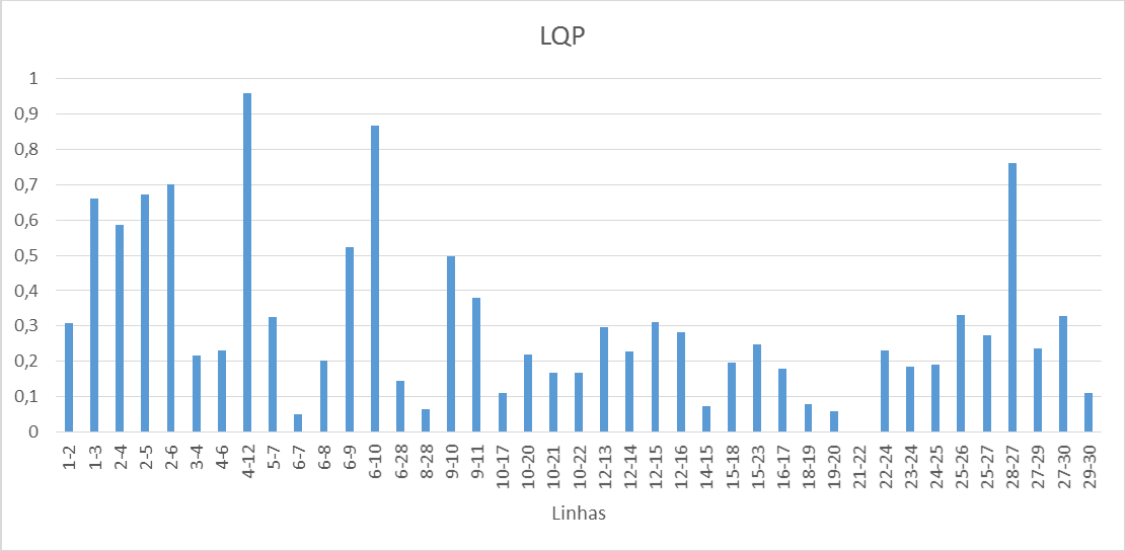


Figura 3.51 - Índice LQP para a potência máxima reativa do sistema

A partir da análise da figura 3.51, quando se varia a potência reativa consumida em todo o sistema, verifica-se que os ramos mais instáveis são os que são constituídos por transformadores, ou seja, 4-12, 6-10 e 28-27. Os valores do índice LQP para as linhas 6-10 é 0.8677, 4-12 é 0.9567 e 28-27 é 0.7597.

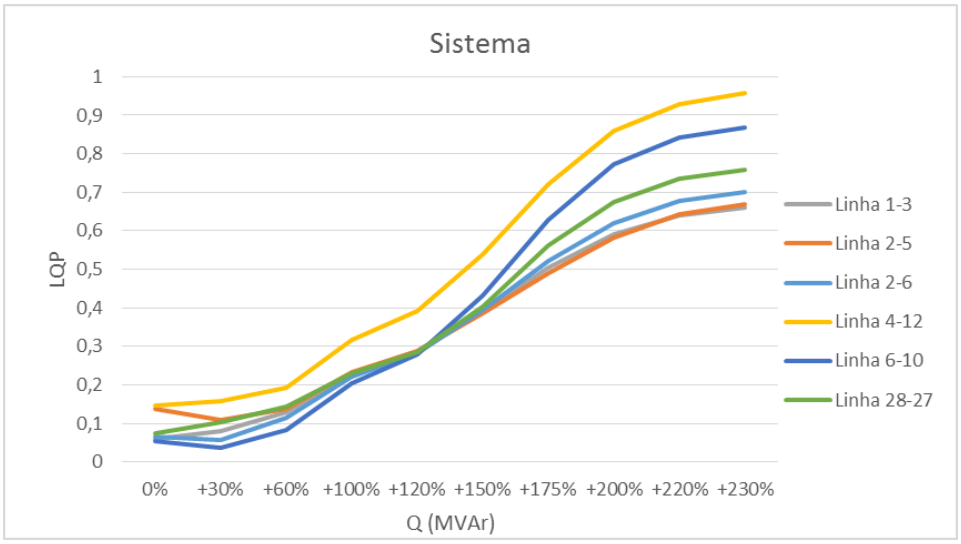


Figura 3.52 - Evolução do índice LQP com o aumento da potência reativa do sistema

Na figura 3.52 é possível verificar a evolução dos índices ao longo dos incrementos de potência reativa para o índice LQP e é possível verificar que os resultados obtidos são os esperados uma vez que quanto maior a energia reativa das cargas, o valor do índice aproxima-se de 1.

3.4.3 Índice FVSI

Os gráficos das figuras 3.53 e 3.54 apresentam os resultados obtidos para o índice FVSI no ponto máximo de potência reativa de carga, ou seja, +230% em todos os barramentos da rede.

Em cada gráfico a linha que apresentar o maior valor do índice de estabilidade de tensão será a linha mais crítica do sistema.

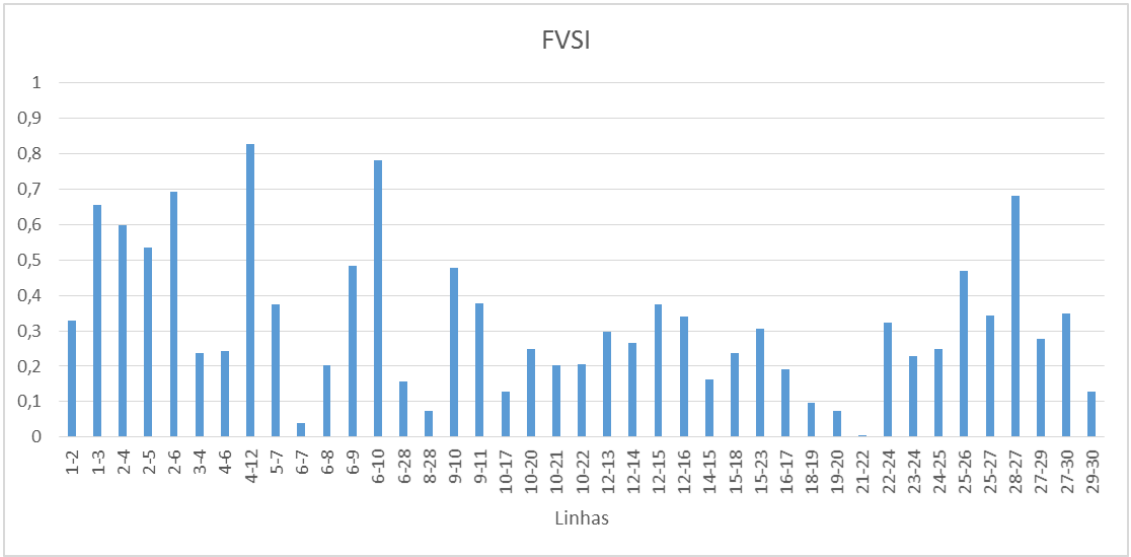


Figura 3.53 - Índice FVSI para a potência máxima reativa do sistema

A partir da análise da figura 3.53, quando se varia a potência reativa consumida em todo o sistema, as linhas mais próximas da instabilidade são as linha 1-3, a linha 2-6 e as linhas 4-12, 6-10 e 28-27 que correspondem a transformadores do sistema. Os valores do índice FVSI para as linhas 1-3 é 0.6555, 2-6 é 0.6913, 6-10 é 0.7817, 4-12 é 0.8258 e 28-27 é 0.6795.

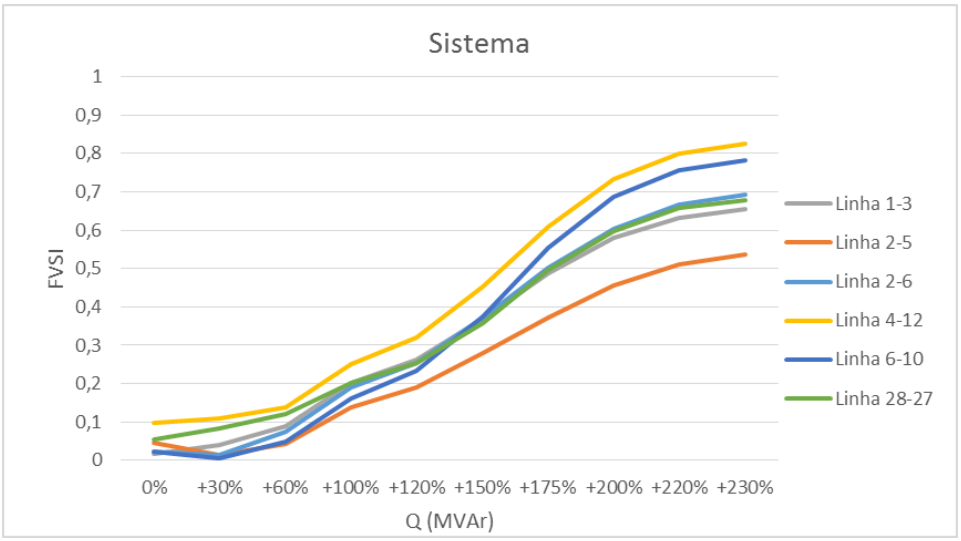


Figura 3.54 - Evolução do índice FVSI com o aumento da potência reativa do sistema

Na figura 3.54 é possível verificar a evolução dos índices ao longo dos incrementos de potência reativa para o índice FVSI e é possível verificar que os resultados obtidos são os esperados uma vez que quanto maior a energia reativa das cargas, o valor do índice aproxima-se de 1.

3.4.4 Índice LCPI

Os gráficos das figuras 3.55 e 3.56 apresentam os resultados obtidos para o índice FVSI no ponto máximo de potência reativa de carga, ou seja, +230% em todos os barramentos da rede. Em cada gráfico a linha que apresentar o maior valor do índice de estabilidade de tensão será a linha mais crítica do sistema.

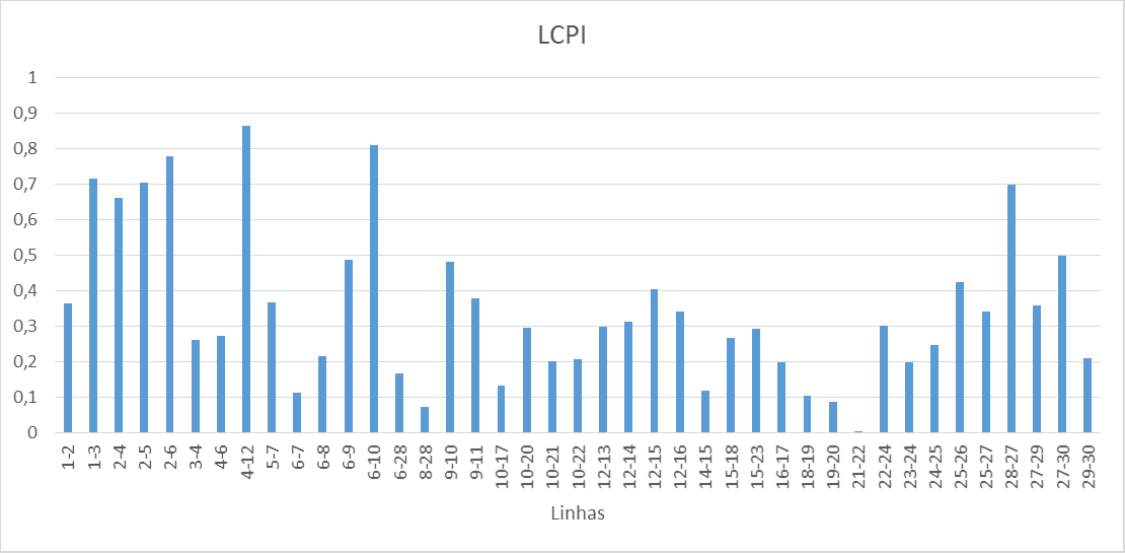


Figura 3.55 - Índice LCPI para a potência máxima reativa do sistema

A partir da análise da figura 3.55, quando se varia a potência reativa consumida em todo o sistema, as linhas mais próximas da instabilidade são as linha 1-3, a linha 2-6 e as linhas 4-12, 6-10 e 28-27 que correspondem a transformadores do sistema. Os valores do índice LCPI para as linhas 1-3 é 0.7177, 2-6 é 0.7807, 6-10 é 0.8107, 4-12 é 0.8657 e 28-27 é 0.6997.

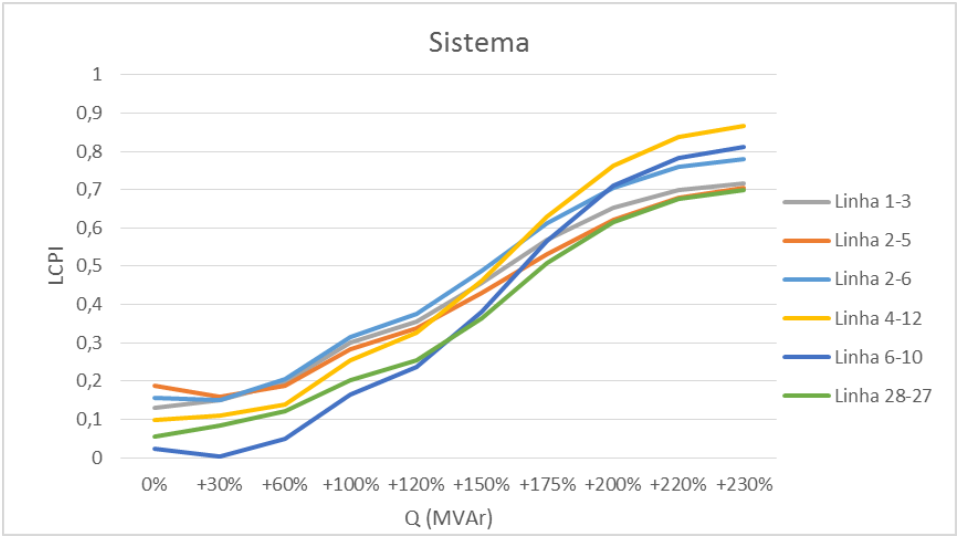


Figura 3.56 - Evolução do índice FVSI com o aumento da potência reativa do sistema

Na figura 3.56 é possível verificar a evolução dos índices ao longo dos incrementos de potência reativa para o índice LCPI e é possível verificar que os resultados obtidos são os esperados uma vez que quanto maior a energia reativa das cargas, o valor do índice aproxima-se de 1.

Com os resultados obtidos é possível concluir que os índices de estabilidade de tensão calculados apresentam coerência entre si, verificando-se que as linhas mais críticas identificadas, foram as mesmas por qualquer dos índices.

O estudo dos índices de tensão, através do aumento da potência reativa consumida em todas as cargas do sistema, mostra uma boa performance dos índices estudados.

O índice LQP apresentou valores mais baixos que os restantes índices, por considerar a potência ativa que é bastante reduzida, uma vez que na expressão, equação 3.2, é considerado o quadrado da potência que transita na linha.

A partir dos resultados obtidos, também se conclui quais são as linhas do sistema que põem em causa a estabilidade de tensão. As linhas que apresentam maiores valores dos índices são as linhas 1-3, 2-6, 4-12, 6-10, 28-27.

Quando os geradores do sistema atingem o limite máximo de produção de energia reativa, o gerador presente no barramento 1 é o que continua a produzir energia para alimentar as cargas, por isso verifica-se que nos barramentos mais próximos do barramento 1 os índices são mais elevados devido ao trânsito de potência que é muito elevado nessas linhas.

Os resultados obtidos para os índices para a variação de potência ativa e reativa isoladamente num barramento, e para todo o sistema, são apresentados no Anexo C, para a situação de limite de carga da rede.

3.5 Conclusão

Através do estudo efetuado, verificou-se que os resultados para os diferentes índices mostraram coerência entre si. Foi possível identificar as linhas mais críticas na rede teste IEEE de 30 barramentos.

Os resultados dos índices de estabilidade FVSI e Lmn, não apresentam um grande desempenho para o estudo da estabilidade de tensão quando se varia a potência ativa da rede, uma vez que não consideram o trânsito de potência ativa nas linhas.

Quando se aumenta a potência reativa de todos os barramentos verifica-se que as linhas mais críticas do sistema são as linhas mais próximas do barramento 1, uma vez que este é o responsável pela maior fatia de produção de energia reativa.

As linhas constituídas por transformadores apresentam sempre valores de índices elevados, o que mostra que são linhas que possuem uma margem de estabilidade de tensão reduzida, o que se deve à elevada reatância dos transformadores, uma vez que é considerada na formulação dos índices de estabilidade de tensão.

Os índices estudados apresentam formulações diferentes, pelo que apresentam valores diferentes. Alguns consideram a potência ativa, caso de LQP e LCPI, outros consideram a impedância das linhas LCPI e FVSI e o índice LCPI ainda tem em conta a susceptância das linhas.

Todos os índices permitem estimar a distância ao ponto de colapso de tensão. Para diferentes variações de carga os índices de tensão devem apresentar valores menores que 1 e

quanto mais próximo de 1 se encontrar o valor do índice mais perto da instabilidade de tensão se encontra o sistema.

Os índices de estabilidade de tensão, têm uma função informativa do desempenho do sistema em diferentes condições de funcionamento, e permitem definir medidas corretivas para melhorar o funcionamento da rede.

Capítulo 4

Conclusões e desenvolvimentos futuros

O trabalho realizado e apresentado nesta dissertação, teve como principal objetivo o estudo da estabilidade de tensão em sistemas elétricos, tema muito atual, devido à complexidade e dimensão crescente dos Sistemas Elétricos de Energia.

A estabilidade de tensão tem de ser assegurada de forma a evitar situações graves que afetem o sistema. É assim necessário identificar as causas e elaborar medidas preventivas e corretivas, para garantir o correto funcionamento do sistema.

Para identificar a proximidade do sistema à instabilidade de tensão existem os índices de estabilidade de tensão que, quando corretamente interpretados, fornecem informação do estado do sistema, de forma a evitar a pior das situações resultantes da instabilidade de tensão que é o colapso de tensão, resultando num *blackout*.

Os índices de estabilidade de tensão são calculados para as redes em funcionamento, permitindo assim uma monotorização do estado dos sistemas elétricos permitindo aplicar ações preventivas e definir ações corretivas.

Neste trabalho foram apresentadas várias técnicas de análise de estabilidade de tensão e foram implementados alguns índices de estabilidade de tensão de forma a mostrar a importância que têm na análise da estabilidade de tensão. Estes índices possuem baixo custo computacional, o que é uma grande vantagem, pois podem ser obtidos de uma forma rápida de forma a serem uteis.

Os desenvolvimentos futuros deverão passar por um aplicação dos índices de estabilidade de tensão em redes reais e com aquisição direta de dados da rede de forma a determinar o estado do sistema em tempo real. Para garantir isso será necessário uma interligação com sistemas SCADA/DMS das redes atuais e a aplicação de algoritmos para o cálculo dos índices de tensão.

Para além dessa aquisição de dados e informação recolhida para a análise de estabilidade, os mecanismos utilizados para o controlo de tensão (tomadas de transformadores, baterias de condensadores, FACTS, etc.) têm que estar interligados para executar as ações necessárias na

rede, o mais rapidamente possível, de forma a garantir uma melhor qualidade de serviço prestado pelos operadores das redes.

Outro objetivo futuro seria analisar os índices de estabilidade de tensão para uma rede de dimensão real, analisando a evolução das cargas, de forma a ter uma noção real dos investimentos a realizar nos sistemas elétricos de energia.

Referências

[1] P. Kundur
"Power System Stability and Control"
McGraw-Hill, New York, 1994

[2] F. A. Althowibi, M. W. Mustafa
"Voltage Collapse Sensitivity in Power Systems"
International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering (IJAREEIE), July 2013

[3] António Carvalho de Andrade
"Análise da Estabilidade de Tensão em Sistemas Elétricos de Energia"
Dissertação de Doutoramento, FEUP, 2005

[4] M. H. Haque
"A fast method for determining the voltage stability limit of a power system"
Electric Power Systems Research, August, 1994

[5] Richa, Sh. Vivek Kumar, Sh. Kumar Dhiraj
"Voltage instability and its prevention using facts controller"
International Journal of Engineering Research and Development, September 2012

[6] Cláudia Sofia Marcos Machado dos Reis
"Determinação de Índices de Estabilidade de Tensão"
Dissertação de Mestrado, FEUP, 2005

[7] Xi Chen, Wenzhong Gao
"Effects fs Distributed Generation on Power Loss, Loadability and Stability"
Southeastcon, 2008. IEEE, pp 468-473, April 2008

[8] C. Reis and F. P. M. Barbosa
"A comparison of voltage stability indices"
Electrotechnical Conference, 2006. MELECON 2006. IEEE Mediterranean

[9] Snehal B. Bhaladhare, A. S. Telang, Prashant P. Bedekar
"P-V, Q-V Curve – A Novel Approach for Voltage Stability Analysis"
National Conference on Innovative Paradigms in Engineering & Technology (NCIPET), 2013

[10] Prechanon Kumkratug
"Power-Voltage Characteristics of Power System with the Short Transmission Line"
American Journal of Applied Sciences 9, 2012

[11] T. Van Cutsem, C. Vournas
"Voltage Stability of Electric Power Systems"
Kluwer Academic Publishers, Boston, 2008

[12] Rogério Rocha Matarucco
"Método da Continuação Aplicado na Análise de Contingência de Linhas de Transmissão"
Tese doutoramento, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, 2010

[13] F. Maciel Barbosa
"O Trânsito de Potências em Sistemas Elétricos de Energia"
FEUP, Janeiro 2013

[14] Badrul H. Chowdhury, Carson W. Taylor
"Voltage Stability Analysis: V-Q Power Flow Simulation Versus Dynamic Simulation"
IEEE Transactions on Power Systems, November 2000

[15] Power System Dynamic Performance Committee, Power System Stability Subcommittee
"Voltage Stability Assessment: Concepts, Practices and Tools"
IEEE Power Energy Society, August 2002

[16] Estelio da Silva Amorim
"Aplicação da Análise Modal Estática no Estudo de Estabilidade de Tensão"
Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista, Janeiro de 2011

[17] Rajive Tiwari, K. R. iazi, Vikas Gupta
"Line colapse procximity índex for prediction of voltage colapse in power Systems"
Electrical Power & Energy Systems, Abril 2012

[18] Tomasz Okoń, Kazimierz Wilkosz
"Properties of Indices for Voltage Stability Assessment"
The 8th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering, Maio 2013

[19] A. Mohamed, G. B.Jasmon, S. Yusoff
"A Static Voltage Collapse Indicator using Line Stability Factors"
Journal of Industrial Technology, Setembro 1898

[20] Zhang Xi, Wong Chi Kong
"Comparison of Voltage Stability Indexes Considering Dynamic Load"
IEEE Electrical Power and Energy Conference, 2011

[21] Pinki Yadav, P. R. Sharma, S. k. Gupta
"Enhancement of Voltage Stability in Power System Using Unified Power Flow Controller"
IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE), Janeiro 2014

[22] I. Musirin, T. K. A. Rahman
"Novel Fast Voltage Stability Index (FVSI) for Voltage Stability Analysis in Power Transmission System"
Student Conference on Research and Development Proceedings, Shah Alam, Malaysia, 2002

[23] Tirtha Sankar Daphadar, Tarit Kanti Paul, N. n. Jana,
"Voltage Stability Enhancement and Loss Minimization of Bus and line Static Indicators in Presence of SVC"
International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, January 2014

[24] Renuga Verayiah, Izham Zainal Abidin
"A Study on Static Voltage Collapse Proximity Indicators"
2nd IEEE Internationa Conference on Power and Energy, December, 2008, Malaysia

[25] José Rui da Rocha Pinto Ferreira

"Avaliação da Estabilidade de Tensão com Cenários de Injecção Imprecisos e Identificação de Procedimentos de Controlo"
Dissertação de Doutoramento, FEUP, 1999

[26] M. Moghavvemi, F. M.Omar
"Tecnhique for Contingency Monitoring and Voltage Collapse Prediction"
IEEE Proceeding on Generation, Transmission and Distribuition, Vol.145, Nº6, pp. 634-640 Novembro de 1998

Anexo A

Rede teste IEEE 30 barramentos

Neste anexo, encontram-se as características da rede teste IEEE 30 barramentos na tabela A1 e trânsito de potências para o caso base, na tabela A2 e tabela A3.

Tabela A1 - Características rede IEEE 30 barramentos

Dados Rede IEEE 30 barramentos			
Linha	**R (p.u)**	**X (p.u.)**	**B (p.u.)**
1-2	0,0192	0,0575	0,0528
1-3	0,0452	0,1652	0,0408
2-4	0,057	0,1737	0,0368
2-5	0,0472	0,1983	0,0418
2-6	0,0581	0,1763	0,0374
3-4	0,0132	0,0379	0,0084
4-6	0,0119	0,0414	0,009
4-12	0	0,256	0
5-7	0,046	0,116	0,0204
6-7	0,0267	0,082	0,017
6-8	0,012	0,042	0,009
6-9	0	0,208	0
6-10	0	0,556	0
6-28	0,0169	0,0599	0,013
8-28	0,0636	0,2	0,0428
9-10	0	0,11	0
9-11	0	0,208	0
10-17	0,0324	0,0845	0
10-20	0,0936	0,209	0
10-21	0,0348	0,0749	0
10-22	0,0727	0,1499	0
12-13	0	0,14	0
12-14	0,1231	0,2559	0
12-15	0,0662	0,1304	0
12-16	0,0945	0,1987	0
14-15	0,221	0,1997	0
15-18	0,1073	0,2185	0
15-23	0,1	0,202	0
16-17	0,0524	0,1923	0
18-19	0,0639	0,1292	0
19-20	0,034	0,068	0
21-22	0,0116	0,0236	0
22-24	0,115	0,179	0
23-24	0,132	0,27	0
24-25	0,1885	0,3292	0
25-26	0,2544	0,38	0
25-27	0,1093	0,2087	0
28-27	0	0,396	0
27-29	0,2198	0,4153	0
27-30	0,3202	0,6027	0
29-30	0,2399	0,4533	0

As linhas 1-2 e 10-21, possuem 2 linhas em paralelo.

Tabela A2 - Trânsito de potências caso base

Trânsito de Potências caso base						
Número	**V(p.u.)**	**Angle graus)**	**Pcarga (MW)**	**Qcarga (MVAr)**	**Pg (MW)**	**Qg (MVAr)**
1	1,06	0	0	0	258,1	-2,24
2	1,045	-2,79	21,7	12,7	40	23,49
3	1,02208	-6,06	2,4	1,2	0	0
4	1,01292	-7,45	7,6	1,6	0	0
5	1,01002	-11,84	94,2	19	0	35,63
6	1,01075	-9,04	0	0	0	0
7	1,00266	-10,72	22,8	10,9	0	0
8	1,01	-9,78	30	30	0	35,7
9	1,05112	-12,13	0	0	0	0
10	1,04532	-13,74	5,8	2	0	0
11	1,082	-12,13	0	0	0	16,06
12	1,05763	-13,02	11,2	7,5	0	0
13	1,071	-13,02	0	0	0	10,23
14	1,04294	-13,9	6,2	1,6	0	0
15	1,03859	-13,98	8,2	2,5	0	0
16	1,04479	-13,59	3,5	1,8	0	0
17	1,04016	-13,91	9	5,8	0	0
18	1,02882	-14,59	3,2	0,9	0	0
19	1,02617	-14,76	9,5	3,4	0	0
20	1,03018	-14,56	2,2	0,7	0	0
21	1,0379	-14,01	17,5	11,2	0	0
22	1,03762	-14,03	0	0	0	0
23	1,029	-14,32	3,2	1,6	0	0
24	1,02458	-14,43	8,7	6,7	0	0
25	1,0194	-14	0	0	0	0
26	1,00176	-14,42	3,5	2,3	0	0
27	1,02472	-13,48	0	0	0	0
28	1,00733	-9,66	0	0	0	0
29	1,00491	-14,71	2,4	0,9	0	0
30	0,99345	-15,59	10,6	1,9	0	0

O barramento 10 e o barramento 24 têm ligados baterias de condensadores de 19 MVAr e 4.30 MVAr, respetivamente.

Tabela A3 - Trânsito de potências nas linhas caso base

Linha	MW From	Mvar From	MW To	Mvar To
1-2	93,2	-4,2	-91,7	2,8
1-3	71,5	6,1	-69,4	-2,9
2-4	51	2,6	-49,7	-2,3
2-5	84,8	2,6	-81,7	6,1
2-6	65,9	0,1	-63,6	3
3-4	67	1,7	-66,5	-1
4-6	65	-12,9	-64,5	13,7
4-12	43,6	14,5	-43,6	-9,9
5-7	-12,5	10,5	12,6	-12,2
6-7	35,7	-2	-35,4	1,3
6-8	29,5	-6,9	-29,4	6,4
6-9	28,1	-8	-28,1	9,7
6-10	16,1	0,2	-16,1	1,1
6-28	18,6	0	-18,5	-1,1
8-28	-0,6	-0,7	0,6	-3,7
9-10	28,1	5,9	-28,1	-5,1
9-11	0	-15,6	0	16,1
10-17	5,4	4,3	-5,4	-4,3
10-20	9	3,6	-8,9	-3,4
10-21	9,5	6	-9,5	-5,9
10-22	5	3	-5	-2,9
12-13	0	-10,1	0	10,2
12-14	7,7	2,4	-7,7	-2,2
12-15	17,5	6,7	-17,3	-6,3
12-16	7,2	3,5	-7,1	-3,3
14-15	1,5	0,6	-1,5	-0,6
15-18	6	1,7	-6	-1,6
15-23	4,5	2,7	-4,5	-2,7
16-17	3,6	1,5	-3,6	-1,5
18-19	2,8	0,7	-2,8	-0,7
19-20	-6,7	-2,7	6,7	2,7
21-22	1,4	0,5	-1,4	-0,5
22-24	6,4	3,5	-6,4	-3,4
23-24	1,3	1,1	-1,3	-1,1
24-25	-1,1	2,2	1,1	-2,2
25-26	3,5	2,4	-3,5	-2,3
25-27	-4,6	-0,1	4,7	0,2
28-27	17,9	4,8	-17,9	-3,5
27-29	6,2	1,7	-6,1	-1,5
27-30	7,1	1,7	-6,9	-1,4
29-30	3,7	0,6	-3,7	-0,5

Anexo B

Resultados do trânsito de potências (+230%)

Nas tabelas B1 e B2 são apresentados os resultados do trânsito de potências para o estudo da variação da potência reativa de todos os barramentos do sistema para o máximo carregamento do sistema (+230%)

Tabela B1 - Trânsito de potências para +230% potência reativa em todas as cargas do sistema

Trânsito de Potências caso +230%						
Número	**V(p.u.)**	**Angle graus)**	**Pcarga (MW)**	**Qcarga (MVAr)**	**Pg (MW)**	**Qg (MVAr)**
1	1,06	0	0	0	290,5	454,02
2	0,95352	-1,74	21,7	41,91	40	50
3	0,81216	-4,19	2,4	3,96	0	0
4	0,75525	-5,22	7,6	5,28	0	0
5	0,72325	-13,33	94,2	66	0	40
6	0,69953	-6,87	0	0	0	0
7	0,67878	-10,12	22,75	35,89	0	0
8	0,65968	-7,55	29,75	98,19	0	40
9	0,61469	-13,21	0	0	0	0
10	0,52707	-17,77	4,97	5,65	0	0
11	0,68732	-13,21	0	0	0	24
12	0,59272	-17,62	10,56	23,34	0	0
13	0,64482	-17,62	0	0	0	24
14	0,5415	-19,21	5,45	4,64	0	0
15	0,52485	-18,62	7	7,04	0	0
16	0,537	-17,63	3,05	5,18	0	0
17	0,50889	-17,99	7,44	15,83	0	0
18	0,48663	-19,61	2,52	2,34	0	0
19	0,47355	-19,82	7,25	8,56	0	0
20	0,48416	-19,42	1,72	1,81	0	0
21	0,49885	-17,79	14,17	29,93	0	0
22	0,49833	-17,79	0	0	0	0
23	0,48323	-18,19	2,5	4,13	0	0
24	0,45767	-17,25	6,37	16,19	0	0
25	0,48966	-17,27	0	0	0	0
26	0,43025	-16,16	2,37	5,13	0	0
27	0,54044	-17,3	0	0	0	0
28	0,66901	-7,51	0	0	0	0
29	0,48634	-19,69	1,89	2,34	0	0
30	0,45929	-21,99	7,8	4,61	0	0

Tabela B2 - Trânsito de potências nas linhas para +230% potência reativa em todas as cargas do sistema

Linha	MW From	Mvar From	MW To	Mvar To
1-2	107,1	158,4	-100,7	-144,6
1-3	76,3	137,3	-66,1	-103,7
2-4	55,2	89,8	-48	-70,7
2-5	92,7	93,9	-83,5	-58,1
2-6	71,8	113,5	-60	-80,4
3-4	63,7	99,7	-60,9	-92,2
4-6	61,1	84,4	-58,8	-76,9
4-12	40,3	73,3	-40,3	-46
5-7	-10,7	32,1	11,8	-30,5
6-7	35,2	6,7	-34,5	-5,4
6-8	29,8	57,7	-28,7	-54,5
6-9	23,4	35,9	-23,4	-28,4
6-10	12,9	26,5	-12,9	-17,2
6-28	17,5	30,4	-17,1	-29,5
8-28	-1	-3,7	1	1,8
9-10	23,4	49,9	-23,4	-41,1
9-11	0	-21,5	0	24
10-17	4,9	9,5	-4,7	-9,1
10-20	7	7,7	-6,6	-6,9
10-21	7,7	16,3	-7,3	-15,4
10-22	4	8,1	-3,8	-7,7
12-13	0	-22,1	0	24
12-14	7,5	8,3	-7	-7,4
12-15	15,8	22,9	-14,3	-20
12-16	6,5	13,5	-5,9	-12,3
14-15	1,6	2,8	-1,5	-2,7
15-18	5,3	6,6	-5	-6
15-23	3,6	9,1	-3,2	-8,4
16-17	2,8	7,1	-2,7	-6,7
18-19	2,5	3,7	-2,4	-3,6
19-20	-4,8	-5	4,9	5,1
21-22	0,5	0,9	-0,5	-0,9
22-24	4,3	8,6	-3,9	-7,9
23-24	0,7	4,2	-0,6	-4
24-25	-1,9	-3,4	2	3,6
25-26	2,8	5,8	-2,4	-5,1
25-27	-4,8	-9,4	5,3	10,4
28-27	16	27,7	-16	-19,2
27-29	5	4,5	-4,7	-3,8
27-30	5,7	4,4	-5,1	-3,3
29-30	2,8	1,5	-2,7	-1,3

Anexo C

Índices de estabilidade de todas as linhas do sistema

Neste anexo, são apresentados os valores dos índices de estabilidade de todas as linhas do sistema para o carregamento máximo, dos três estudos efetuados, usando critérios diferentes para a variação da carga do sistema.

Nas tabelas C1 a C6 são apresentados os valores dos índices, para o caso em que se varia a potência reativa consumida apenas num barramento.

Nas tabelas C7 a C11 são apresentados os valores dos índices, para o caso em que se varia a potência ativa consumida num barramento.

Por fim na tabela C12 são apresentados os valores dos índices para o caso em que se variou a potência reativa consumida em todos os barramentos do sistema.

Variação da potência reativa apenas num barramento

Tabela C1 - Índices variação potência reativa no barramento 3

Barramento 3				
Linha	**LQP**	**Lmn**	**FVSI**	**LCPI**
1-2	0,18480	0,19691	0,19066	0,24609
1-3	0,83658	0,99533	0,84706	0,87786
2-4	0,58704	0,62570	0,59517	0,66605
2-5	0,29514	0,17970	0,15713	0,33235
2-6	0,46877	0,47404	0,43173	0,56494
3-4	0,46300	0,54028	0,51201	0,50877
4-6	0,24585	0,26891	0,26066	0,28098
4-12	0,20188	0,07373	0,07193	0,07373
5-7	0,26130	0,31012	0,30200	0,27274
6-7	0,13989	0,15397	0,14920	0,18017
6-8	0,02237	0,02411	0,02383	0,04314
6-9	0,11968	0,08864	0,08802	0,08864
6-10	0,09857	0,02695	0,02651	0,02695
6-28	0,01221	0,01206	0,01195	0,03000
8-28	0,01452	0,01602	0,01598	0,01637
9-10	0,09119	0,08379	0,08362	0,08379
9-11	0,22748	0,22748	0,22748	0,22748
10-17	0,02601	0,02971	0,02961	0,03627
10-20	0,05132	0,05906	0,05785	0,09733
10-21	0,02763	0,03329	0,03307	0,04625
10-22	0,02813	0,03440	0,03415	0,04860
12-13	0,16611	0,16611	0,16611	0,16611
12-14	0,03338	0,03820	0,03730	0,08308
12-15	0,04594	0,05418	0,05270	0,10541
12-16	0,02730	0,03210	0,03159	0,06253
14-15	0,00595	0,01315	0,01308	0,02409
15-18	0,01579	0,01809	0,01777	0,05141
15-23	0,02955	0,03630	0,03596	0,05391
16-17	0,00596	0,00605	0,00601	0,01597
18-19	0,00090	0,00099	0,00098	0,01095
19-20	0,01382	0,01711	0,01702	0,02785
21-22	0,00181	0,00225	0,00225	0,00291
22-24	0,04776	0,06661	0,06575	0,09072
23-24	0,01330	0,01644	0,01639	0,02132
24-25	0,02475	0,03303	0,03266	0,03868
25-26	0,05623	0,08008	0,07881	0,10987
25-27	0,01615	0,01968	0,01940	0,04712
28-27	0,16537	0,11869	0,11735	0,11869
27-29	0,04671	0,05371	0,05170	0,12203
27-30	0,06502	0,06538	0,06106	0,18257
29-30	0,02060	0,02321	0,02258	0,07525

Tabela C2 - Índices variação potência reativa no barramento 4

Barramento 4				
Linha	**LQP**	**Lmn**	**FVSI**	**LCPI**
1-2	0,26466	0,28658	0,27872	0,32574
1-3	0,76221	0,95408	0,75920	0,81342
2-4	0,75588	0,80488	0,77956	0,82014
2-5	0,40455	0,28704	0,24705	0,43564
2-6	0,62930	0,65419	0,59832	0,71791
3-4	0,28908	0,31996	0,31635	0,33641
4-6	0,36876	0,40623	0,38866	0,41464
4-12	0,31386	0,10333	0,09914	0,10333
5-7	0,38582	0,46189	0,44609	0,39545
6-7	0,21749	0,24207	0,23242	0,26488
6-8	0,02515	0,02750	0,02710	0,05123
6-9	0,10141	0,05266	0,05208	0,05266
6-10	0,20552	0,09672	0,09417	0,09672
6-28	0,02295	0,02312	0,02286	0,04482
8-28	0,02862	0,03161	0,03151	0,03040
9-10	0,13836	0,12650	0,12609	0,12650
9-11	0,27489	0,27489	0,27489	0,27489
10-17	0,03620	0,04133	0,04115	0,04964
10-20	0,07230	0,08260	0,08037	0,13121
10-21	0,03643	0,04380	0,04342	0,06034
10-22	0,03766	0,04595	0,04552	0,06393
12-13	0,20717	0,20717	0,20717	0,20717
12-14	0,04251	0,04746	0,04598	0,10481
12-15	0,05720	0,06581	0,06342	0,13173
12-16	0,03005	0,03451	0,03378	0,07447
14-15	0,00626	0,01382	0,01371	0,02834
15-18	0,01615	0,01740	0,01699	0,06247
15-23	0,03591	0,04387	0,04334	0,06693
16-17	0,00204	0,00158	0,00157	0,01458
18-19	0,00123	0,00131	0,00130	0,01397
19-20	0,01937	0,02393	0,02376	0,03802
21-22	0,00272	0,00338	0,00338	0,00415
22-24	0,06546	0,09101	0,08956	0,12007
23-24	0,01323	0,01633	0,01627	0,02277
24-25	0,01651	0,02173	0,02145	0,03774
25-26	0,07461	0,10578	0,10351	0,14433
25-27	0,03291	0,04049	0,03978	0,07340
28-27	0,25284	0,17930	0,17594	0,17930
27-29	0,06292	0,07042	0,06697	0,15819
27-30	0,09086	0,08668	0,07910	0,23709
29-30	0,02852	0,03101	0,02988	0,09964

Tabela C3 - Índices variação potência reativa no barramento 5

Barramento 5				
Linha	**LQP**	**Lmn**	**FVSI**	**LCPI**
1-2	0,18302	0,19659	0,19112	0,24004
1-3	0,30511	0,32832	0,26803	0,37555
2-4	0,17954	0,16447	0,15306	0,26786
2-5	0,84643	0,84840	0,77134	0,88131
2-6	0,25947	0,22985	0,20783	0,35911
3-4	0,06975	0,07521	0,07380	0,10889
4-6	0,08958	0,09285	0,09110	0,12598
4-12	0,13750	0,06265	0,06171	0,06265
5-7	0,47594	0,53715	0,53863	0,53269
6-7	0,35694	0,38797	0,38084	0,41195
6-8	0,02797	0,02249	0,02227	0,03836
6-9	0,18305	0,16260	0,16186	0,16260
6-10	0,14417	0,09652	0,09552	0,09652
6-28	0,00166	0,00099	0,00098	0,01628
8-28	0,00307	0,00337	0,00336	0,00530
9-10	0,03597	0,03129	0,03125	0,03129
9-11	0,19273	0,19273	0,19273	0,19273
10-17	0,00319	0,00357	0,00356	0,01038
10-20	0,01700	0,01874	0,01842	0,05143
10-21	0,02020	0,02437	0,02423	0,03510
10-22	0,02024	0,02478	0,02463	0,03662
12-13	0,12997	0,12997	0,12997	0,12997
12-14	0,03601	0,04262	0,04185	0,07674
12-15	0,05684	0,06951	0,06816	0,10557
12-16	0,05982	0,07267	0,07203	0,08952
14-15	0,01342	0,02974	0,02971	0,03207
15-18	0,03471	0,04227	0,04176	0,06524
15-23	0,04631	0,05731	0,05695	0,06929
16-17	0,04347	0,04651	0,04636	0,05280
18-19	0,01523	0,01888	0,01883	0,02501
19-20	0,00298	0,00362	0,00360	0,01282
21-22	0,00055	0,00068	0,00068	0,00136
22-24	0,02751	0,03827	0,03782	0,06117
23-24	0,04197	0,05185	0,05180	0,05358
24-25	0,05542	0,07437	0,07358	0,05822
25-26	0,04442	0,06347	0,06266	0,08736
25-27	0,01068	0,01325	0,01309	0,03127
28-27	0,08083	0,05076	0,05041	0,05076
27-29	0,03469	0,04047	0,03926	0,09676
27-30	0,05264	0,05623	0,05327	0,15068
29-30	0,01364	0,01537	0,01504	0,05778

Tabela C4 - Índices variação potência reativa no barramento 15

Barramento 15				
Linha	**LQP**	**Lmn**	**FVSI**	**LCPI**
1-2	0,10954	0,11291	0,10921	0,16774
1-3	0,38046	0,41340	0,35526	0,44852
2-4	0,34883	0,36577	0,34659	0,43046
2-5	0,22075	0,11490	0,10190	0,26385
2-6	0,35506	0,35145	0,32241	0,45098
3-4	0,09683	0,10605	0,10430	0,13533
4-6	0,00649	0,00116	0,00113	0,04305
4-12	0,91367	0,86019	0,83783	0,86019
5-7	0,19591	0,23161	0,22613	0,21152
6-7	0,09996	0,10877	0,10580	0,13781
6-8	0,01394	0,01445	0,01430	0,03218
6-9	0,31385	0,28178	0,27915	0,28178
6-10	0,59282	0,52655	0,51372	0,52655
6-28	0,04700	0,04982	0,04940	0,06546
8-28	0,04163	0,04591	0,04582	0,04346
9-10	0,28506	0,27380	0,27282	0,27380
9-11	0,23789	0,23789	0,23789	0,23789
10-17	0,08779	0,10027	0,09990	0,10687
10-20	0,33553	0,39439	0,39135	0,40470
10-21	0,05348	0,06463	0,06423	0,07619
10-22	0,06784	0,08332	0,08287	0,09322
12-13	0,22345	0,22345	0,22345	0,22345
12-14	0,33668	0,40427	0,39989	0,41911
12-15	0,58752	0,69009	0,72910	0,63628
12-16	0,11663	0,14584	0,14195	0,14303
14-15	0,27243	0,52241	0,60304	0,32490
15-18	0,44427	0,59012	0,54772	0,48646
15-23	0,40065	0,52475	0,49855	0,40887
16-17	0,13835	0,14938	0,14863	0,13836
18-19	0,24579	0,31462	0,30592	0,24867
19-20	0,12670	0,15701	0,15726	0,15461
21-22	0,01598	0,01982	0,01984	0,01786
22-24	0,19477	0,26859	0,27176	0,24968
23-24	0,56016	0,71977	0,69248	0,60970
24-25	0,21362	0,27807	0,27795	0,27913
25-26	0,06335	0,09007	0,08844	0,12331
25-27	0,16283	0,20450	0,20239	0,22174
28-27	0,41712	0,36300	0,35706	0,36300
27-29	0,04767	0,05472	0,05263	0,12423
27-30	0,06650	0,06666	0,06216	0,18587
29-30	0,02105	0,02367	0,02301	0,07670

Tabela C54 - Índices variação potência reativa no barramento 19

Barramento 19				
Linha	**LQP**	**Lmn**	**FVSI**	**LCPI**
1-2	0,06827	0,06620	0,06393	0,12556
1-3	0,27415	0,27508	0,24084	0,34367
2-4	0,24656	0,24963	0,23541	0,32917
2-5	0,16569	0,06154	0,05494	0,21096
2-6	0,26334	0,24829	0,22799	0,35885
3-4	0,06126	0,06604	0,06490	0,09794
4-6	0,01793	0,01551	0,01523	0,04952
4-12	0,58365	0,50836	0,49728	0,50836
5-7	0,15093	0,17777	0,17400	0,16844
6-7	0,07226	0,07757	0,07564	0,10834
6-8	0,01514	0,01578	0,01563	0,03164
6-9	0,27536	0,25438	0,25287	0,25438
6-10	0,53343	0,48955	0,48207	0,48955
6-28	0,03034	0,03195	0,03169	0,04687
8-28	0,02605	0,02873	0,02868	0,02716
9-10	0,25695	0,24988	0,24933	0,24988
9-11	0,21659	0,21659	0,21659	0,21659
10-17	0,00573	0,00640	0,00637	0,01581
10-20	0,62192	0,70611	0,73572	0,66807
10-21	0,02229	0,02682	0,02665	0,03979
10-22	0,02005	0,02450	0,02433	0,03793
12-13	0,15807	0,15807	0,15807	0,15807
12-14	0,13468	0,16289	0,15987	0,19498
12-15	0,24843	0,30671	0,30567	0,31198
12-16	0,09598	0,11672	0,11580	0,13078
14-15	0,09178	0,19629	0,20312	0,13595
15-18	0,49740	0,58829	0,60923	0,54915
15-23	0,02232	0,02763	0,02729	0,04171
16-17	0,07633	0,08178	0,08156	0,08701
18-19	0,36381	0,43538	0,45162	0,38332
19-20	0,29148	0,35329	0,36360	0,30917
21-22	0,00187	0,00232	0,00232	0,00215
22-24	0,00915	0,01246	0,01232	0,03532
23-24	0,05682	0,07083	0,07040	0,05767
24-25	0,12136	0,15925	0,15804	0,17227
25-26	0,05087	0,07256	0,07150	0,09968
25-27	0,10261	0,12917	0,12763	0,15035
28-27	0,29831	0,25511	0,25213	0,25511
27-29	0,03701	0,04297	0,04160	0,10252
27-30	0,05682	0,05978	0,05644	0,15968
29-30	0,01462	0,01636	0,01599	0,06142

Tabela C6 - Índices variação potência reativa no barramento 30

Barramento 30				
Linha	**LQP**	**Lmn**	**FVSI**	**LCPI**
1-2	0,01714	0,00850	0,00819	0,07238
1-3	0,10591	0,06989	0,06321	0,17529
2-4	0,09572	0,07870	0,07403	0,17564
2-5	0,12321	0,02814	0,02534	0,17196
2-6	0,10359	0,06628	0,06088	0,19646
3-4	0,01442	0,01343	0,01319	0,04733
4-6	0,00541	-0,00275	0,00271	0,03329
4-12	0,15195	0,09184	0,09072	0,09184
5-7	0,08515	0,09948	0,09775	0,10483
6-7	0,03118	0,03150	0,03084	0,06487
6-8	0,00583	0,00563	0,00558	0,01962
6-9	0,09874	0,08127	0,08096	0,08127
6-10	0,04793	-0,00690	0,00683	0,00690
6-28	0,07014	0,07549	0,07524	0,08144
8-28	0,05978	0,06613	0,06582	0,06114
9-10	0,05552	0,05132	0,05126	0,05132
9-11	0,16591	0,16591	0,16591	0,16591
10-17	0,00466	0,00530	0,00528	0,01041
10-20	0,02320	0,02675	0,02638	0,05332
10-21	0,02857	0,03456	0,03439	0,04401
10-22	0,03540	0,04349	0,04326	0,05399
12-13	0,10790	0,10790	0,10790	0,10790
12-14	0,03662	0,04371	0,04301	0,07401
12-15	0,06149	0,07571	0,07442	0,10731
12-16	0,04706	0,05713	0,05663	0,07408
14-15	0,01539	0,03407	0,03405	0,03564
15-18	0,02121	0,02569	0,02540	0,04727
15-23	0,07261	0,08984	0,08932	0,10023
16-17	0,03270	0,03495	0,03483	0,04126
18-19	0,00782	0,00967	0,00964	0,01567
19-20	0,00525	0,00649	0,00646	0,01388
21-22	0,00771	0,00957	0,00957	0,01029
22-24	0,09865	0,13768	0,13663	0,15149
23-24	0,08156	0,10053	0,10041	0,10275
24-25	0,30778	0,41062	0,40483	0,37437
25-26	0,04594	0,06562	0,06476	0,09029
25-27	0,16669	0,21505	0,21212	0,18417
28-27	0,56170	0,54590	0,54272	0,54590
27-29	0,39445	0,48688	0,49224	0,47285
27-30	0,69895	0,81968	0,85780	0,78846
29-30	0,46155	0,56217	0,58233	0,52022

Variação da potência ativa apenas num barramento

Tabela C5 - Índices variação potência ativa no barramento 3

Barramento 3				
Linha	**LQP**	**Lmn**	**FVSI**	**LCPI**
1-2	0,25092	0,22687	0,20636	0,35138
1-3	0,94862	0,07014	0,02339	0,68263
2-4	0,58307	0,13731	0,08669	0,55968
2-5	0,43806	0,12211	0,09348	0,38300
2-6	0,52253	0,13832	0,09238	0,52771
3-4	0,14045	0,08089	0,08651	0,26372
4-6	0,07935	0,07755	0,07899	0,11964
4-12	0,12283	0,00587	0,00573	0,00587
5-7	0,17280	0,17934	0,18482	0,25340
6-7	0,04718	0,05169	0,05184	0,05814
6-8	0,02603	0,02732	0,02693	0,05015
6-9	0,15666	0,09964	0,09835	0,09964
6-10	0,14744	0,01618	0,01570	0,01618
6-28	0,01741	0,01709	0,01689	0,03926
8-28	0,02303	0,02542	0,02536	0,02384
9-10	0,10954	0,09592	0,09557	0,09592
9-11	0,26181	0,26181	0,26181	0,26181
10-17	0,02053	0,02291	0,02271	0,04056
10-20	0,04671	0,05005	0,04841	0,11076
10-21	0,03265	0,03924	0,03890	0,05550
10-22	0,03277	0,03993	0,03955	0,05857
12-13	0,19150	0,19150	0,19150	0,19150
12-14	0,04952	0,05800	0,05661	0,10254
12-15	0,07065	0,08603	0,08402	0,12853
12-16	0,05732	0,06998	0,06970	0,07697
14-15	0,01545	0,03420	0,03433	0,02630
15-18	0,03680	0,04492	0,04441	0,06635
15-23	0,05639	0,06995	0,06984	0,07247
16-17	0,03195	0,03426	0,03432	0,03303
18-19	0,01334	0,01659	0,01659	0,01709
19-20	0,01041	0,01255	0,01243	0,03157
21-22	0,00184	0,00229	0,00228	0,00365
22-24	0,05306	0,07327	0,07183	0,11049
23-24	0,04397	0,05386	0,05438	0,05267
24-25	0,04568	0,06103	0,05956	0,07771
25-26	0,06884	0,09772	0,09581	0,13359
25-27	0,01285	0,01400	0,01368	0,05814
28-27	0,21195	0,13648	0,13394	0,13648
27-29	0,05806	0,06549	0,06249	0,14758
27-30	0,08368	0,08036	0,07381	0,22107
29-30	0,02611	0,02868	0,02771	0,09240

Tabela C8 - Índices variação potência ativa no barramento 5

Barramento 5				
Linha	**LQP**	**Lmn**	**FVSI**	**LCPI**
1-2	0,19203	0,17629	0,16336	0,28487
1-3	0,33774	0,28485	0,20860	0,40128
2-4	0,17106	0,11085	0,09877	0,27190
2-5	0,98875	0,19755	0,09699	0,68206
2-6	0,23591	0,09324	0,07731	0,33167
3-4	0,05650	0,05302	0,05111	0,11721
4-6	0,05324	0,03905	0,03740	0,11198
4-12	0,14728	0,04799	0,04705	0,04799
5-7	0,25682	0,10998	0,08648	0,40364
6-7	0,20544	0,13362	0,11749	0,30675
6-8	0,02728	0,02306	0,02282	0,03963
6-9	0,17473	0,15572	0,15507	0,15572
6-10	0,12124	0,07718	0,07643	0,07718
6-28	0,00362	0,00310	0,00308	0,01848
8-28	0,00535	0,00589	0,00587	0,00801
9-10	0,04449	0,04013	0,04009	0,04013
9-11	0,20043	0,20043	0,20043	0,20043
10-17	0,00616	0,00704	0,00703	0,01067
10-20	0,02266	0,02587	0,02548	0,05474
10-21	0,02166	0,02613	0,02599	0,03702
10-22	0,02134	0,02613	0,02597	0,03825
12-13	0,13593	0,13593	0,13593	0,13593
12-14	0,03466	0,04049	0,03966	0,07928
12-15	0,05630	0,06798	0,06636	0,11204
12-16	0,05819	0,07004	0,06900	0,09708
14-15	0,01134	0,02511	0,02498	0,03504
15-18	0,03179	0,03811	0,03750	0,06861
15-23	0,04331	0,05330	0,05277	0,07244
16-17	0,03987	0,04226	0,04200	0,05422
18-19	0,01296	0,01598	0,01590	0,02635
19-20	0,00481	0,00594	0,00592	0,01353
21-22	0,00070	0,00087	0,00087	0,00138
22-24	0,03074	0,04286	0,04240	0,06405
23-24	0,03786	0,04664	0,04637	0,05703
24-25	0,04995	0,06674	0,06631	0,05290
25-26	0,04700	0,06711	0,06621	0,09231
25-27	0,00574	0,00698	0,00691	0,02416
28-27	0,09657	0,06594	0,06547	0,06594
27-29	0,03684	0,04279	0,04143	0,10211
27-30	0,05654	0,05953	0,05621	0,15903
29-30	0,01455	0,01629	0,01592	0,06116

Tabela C9 - Índices variação potência ativa no barramento 15

Barramento 15				
Linha	**LQP**	**Lmn**	**FVSI**	**LCPI**
1-2	0,10090	0,09013	0,08532	0,17819
1-3	0,36237	0,31325	0,24843	0,42886
2-4	0,29903	0,24865	0,21910	0,40115
2-5	0,21061	0,04132	0,03538	0,23295
2-6	0,30066	0,19840	0,16730	0,40047
3-4	0,06846	0,06754	0,06524	0,12767
4-6	0,02653	0,02263	0,02207	0,06506
4-12	0,78210	0,25225	0,21701	0,25225
5-7	0,14820	0,17135	0,17092	0,16625
6-7	0,06473	0,07146	0,07046	0,08442
6-8	0,01788	0,01867	0,01846	0,03708
6-9	0,15396	0,03962	0,03852	0,03962
6-10	0,38663	0,13172	0,12300	0,13172
6-28	0,02528	0,02527	0,02495	0,04920
8-28	0,02230	0,02434	0,02439	0,03007
9-10	0,14313	0,11163	0,11066	0,11163
9-11	0,21556	0,21556	0,21556	0,21556
10-17	0,02522	0,02667	0,02620	0,05970
10-20	0,11453	0,09750	0,08861	0,24799
10-21	0,03188	0,03809	0,03769	0,05827
10-22	0,03609	0,04352	0,04291	0,07005
12-13	0,16918	0,16918	0,16918	0,16918
12-14	0,06061	0,03225	0,02913	0,20112
12-15	0,17778	0,10935	0,09003	0,38214
12-16	0,03765	0,04257	0,04364	0,07933
14-15	0,02871	0,03700	0,03178	0,26398
15-18	0,02835	0,01136	0,01209	0,14922
15-23	0,06002	0,04531	0,04860	0,18957
16-17	0,01402	0,01053	0,01070	0,04501
18-19	0,01962	0,01299	0,01355	0,10533
19-20	0,02454	0,02581	0,02498	0,08631
21-22	0,00502	0,00618	0,00616	0,01222
22-24	0,07888	0,10226	0,09692	0,19456
23-24	0,07850	0,03247	0,03559	0,26113
24-25	0,04389	0,03394	0,03091	0,18204
25-26	0,05313	0,07573	0,07459	0,10399
25-27	0,03790	0,03541	0,03346	0,13603
28-27	0,25785	0,14819	0,14410	0,14819
27-29	0,03904	0,04513	0,04362	0,10753
27-30	0,06025	0,06289	0,05919	0,16750
29-30	0,01550	0,01723	0,01681	0,06461

Tabela C10 - Índices variação potência ativa no barramento 30

Barramento 30				
Linha	**LQP**	**Lmn**	**FVSI**	**LCPI**
1-2	0,01780	0,00428	0,00410	0,08164
1-3	0,14269	0,08891	0,07775	0,21485
2-4	0,11476	0,08363	0,07720	0,20548
2-5	0,14377	0,02633	0,02335	0,18627
2-6	0,13108	0,06593	0,05881	0,23204
3-4	0,01829	0,01619	0,01582	0,05870
4-6	0,01059	0,00593	0,00580	0,04657
4-12	0,14735	0,06087	0,05981	0,06087
5-7	0,08932	0,10439	0,10326	0,09601
6-7	0,03235	0,03394	0,03335	0,06041
6-8	0,00554	0,00490	0,00486	0,02297
6-9	0,12878	0,10289	0,10229	0,10289
6-10	0,08967	0,02892	0,02853	0,02892
6-28	0,08001	0,08410	0,08296	0,10822
8-28	0,06857	0,07441	0,07472	0,08475
9-10	0,04897	0,04280	0,04273	0,04280
9-11	0,17058	0,17058	0,17058	0,17058
10-17	0,00580	0,00663	0,00662	0,00967
10-20	0,02394	0,02759	0,02721	0,05426
10-21	0,02429	0,02913	0,02890	0,04488
10-22	0,02793	0,03384	0,03347	0,05513
12-13	0,11629	0,11629	0,11629	0,11629
12-14	0,03231	0,03776	0,03701	0,07532
12-15	0,05708	0,06879	0,06711	0,11411
12-16	0,04650	0,05608	0,05538	0,07955
14-15	0,01199	0,02646	0,02626	0,04228
15-18	0,02107	0,02541	0,02510	0,04830
15-23	0,05884	0,07123	0,06984	0,10725
16-17	0,03166	0,03361	0,03343	0,04354
18-19	0,00754	0,00932	0,00929	0,01616
19-20	0,00569	0,00705	0,00702	0,01432
21-22	0,00450	0,00555	0,00554	0,01052
22-24	0,06671	0,08829	0,08463	0,16271
23-24	0,06047	0,07268	0,07122	0,10980
24-25	0,21456	0,22297	0,23923	0,40649
25-26	0,04824	0,06885	0,06791	0,09468
25-27	0,07863	0,08318	0,08675	0,17918
28-27	0,62132	0,45296	0,42634	0,45296
27-29	0,27113	0,24467	0,20129	0,48882
27-30	0,48826	0,08944	0,04952	0,69004
29-30	0,19855	0,04389	0,03296	0,43224

Variação potência reativa em todas as cargas do sistema

Tabela C11 - Índices variação potência reativa em todo o sistema

Sistema				
Linha	**LQP**	**Lmn**	**FVSI**	**LCPI**
1-2	0,30801	0,33609	0,32900	0,36461
1-3	0,66021	0,84811	0,65553	0,71765
2-4	0,58477	0,62538	0,59846	0,66097
2-5	0,67038	0,61687	0,53559	0,70594
2-6	0,70114	0,74004	0,69133	0,78065
3-4	0,21727	0,24069	0,23761	0,26070
4-6	0,23112	0,24596	0,24170	0,27250
4-12	0,95666	0,86572	0,82580	0,86572
5-7	0,32680	0,39255	0,37410	0,36672
6-7	0,05011	0,04169	0,04003	0,11177
6-8	0,20167	0,20379	0,20238	0,21525
6-9	0,52244	0,48883	0,48287	0,48883
6-10	0,86765	0,81071	0,78172	0,81071
6-28	0,14628	0,15695	0,15594	0,16802
8-28	0,06621	0,07285	0,07282	0,07151
9-10	0,49717	0,48165	0,47861	0,48165
9-11	0,37866	0,37866	0,37866	0,37866
10-17	0,11161	0,12737	0,12700	0,13265
10-20	0,21874	0,25606	0,24929	0,29684
10-21	0,16781	0,20200	0,20194	0,20266
10-22	0,16806	0,20536	0,20529	0,20597
12-13	0,29765	0,29765	0,29765	0,29765
12-14	0,22754	0,27294	0,26550	0,31396
12-15	0,31070	0,38029	0,37347	0,40485
12-16	0,28367	0,34127	0,34121	0,34175
14-15	0,07403	0,15998	0,16363	0,11879
15-18	0,19744	0,24041	0,23628	0,26835
15-23	0,24918	0,30452	0,30677	0,29287
16-17	0,18011	0,19265	0,19199	0,19835
18-19	0,07931	0,09814	0,09778	0,10447
19-20	0,05883	0,07303	0,07252	0,08587
21-22	0,00341	0,00424	0,00424	0,00435
22-24	0,23162	0,31796	0,32179	0,30004
23-24	0,18526	0,22565	0,22922	0,19862
24-25	0,18974	0,24785	0,24795	0,24648
25-26	0,33119	0,45648	0,46822	0,42533
25-27	0,27440	0,34217	0,34236	0,34052
28-27	0,75966	0,69973	0,67950	0,69973
27-29	0,23635	0,28981	0,27667	0,35823
27-30	0,32772	0,38439	0,34926	0,49937
29-30	0,11118	0,13339	0,12757	0,20954