



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
Departamento de Sistemas de Energia Elétrica

Aplicação de Lógica Nebulosa na Análise de Redes de Energia Elétrica

Ana Carolina Garcia Canôas
Aluna

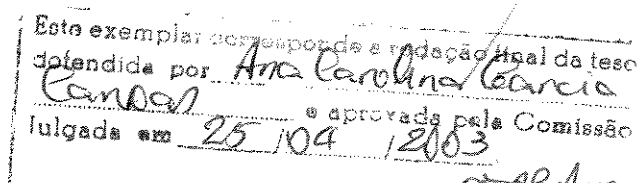
Prof. Dr. Carlos Alberto F. Murari
Orientador

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Carlos Alberto Favarin Murari - UNICAMP/FEEC
Prof. Dr. Nelson Kagan - USP/POLI
Prof. Dr. Marcelo Adorni Pereira - CREUPI
Prof. Dr. André Luiz Morelato França - UNICAMP/FEEC

Campinas, 25 de abril de 2003



UNIDADE	B C
Nº CHAMADA	UNICAMP
	C 165a
V	EX
TOMBO BC/	56489
PROC.	16-124103
C	☐
D	☒
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	07/24/03
Nº CPD	

CM00192003-7

ibid 305160

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

C165a Canoas, Ana Carolina Garcia
Aplicação de lógica nebulosa na análise de redes de energia elétrica / Ana Carolina Garcia Canôas.-- Campinas, SP: [s.n.], 2003.

Orientador: Carlos Alberto Favarin Murari
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Sistemas de energia elétrica. 2. Potencia reativa (Engenharia elétrica). 3. Conjuntos difusos. 4. Números difusos. 5. Línguas artificiais. I. Murari, Carlos Alberto Favarin. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

*Aos meus queridos pais José Urbano e Cidinha
e ao meu irmão Urbano*

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

Agradecimentos

Ao professor Carlos Alberto F. Murari, pela excelente orientação e auxílio constante ao longo destes anos.

Aos professores da UNICAMP com quem pude aprender muito.

Aos professores da Faculdade de Engenharia de Barretos que me impulsionaram para mais este degrau da minha vida pessoal e profissional.

À Miriam von Zuben por manter a rede computacional do DSEE sempre funcionando e atualizada.

À Edna Servidone por ser sempre prestativa.

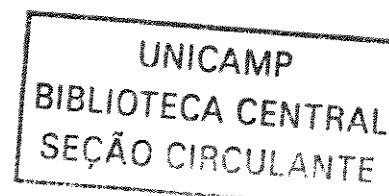
Agradeço à Noêmia, secretária da pós-graduação/FEEC, pelo carinho e atenção com que sempre me atendeu.

Sem citar nomes para não ser injusta, agradeço a todos os amigos do DSEE que de alguma forma contribuíram neste trabalho. Oportunamente agradeço aos demais amigos pela amizade, paciência e incentivo.

Nesta oportunidade gostaria de agradecer aos meus pais José Urbano e Cidinha, ao meu irmão Urbano e a Érika, pela inesgotável fonte de amor, carinho, incentivo e suporte que propiciaram durante toda a minha jornada acadêmica.

À minha madrinha Shirley pelo carinho e pela paciência nos momentos de chatice.

À FAPESP pelo apoio financeiro.



Resumo

Este trabalho de pesquisa apresenta uma nova aplicação da lógica nebulosa no desenvolvimento de metodologia de análise de desempenho de redes de energia elétrica de qualquer dimensão, sendo estimulada pela possibilidade de aplicar os conceitos de conjuntos nebulosos para traduzir resultados numéricos em lingüísticos. Para representar os números nebulosos foi utilizada a função de pertinência sinusoidal.

Os modelos matemáticos podem ser adaptados com a finalidade de se obter resultados o mais próximos da realidade, mas há situações onde isto não é possível, como por exemplo na operação dos sistemas de energia elétrica, onde um operador poderá afirmar “a tensão em determinada barra está boa”, sendo que tal tipo de informação pode ser interpretada de diferentes maneiras por diferentes pessoas. Assim, associando-se um grau de pertinência em um determinado intervalo de variação, viabiliza-se a determinação de padrões de análise.

Abstract

This work presents a new application of fuzzy sets in the development of new methodologies for electric energy performance analysis. The main motivation for the application of fuzzy sets concepts is the ability in translating numeric results into linguistics.

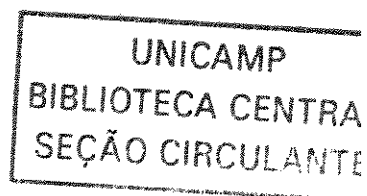
For certain problem classes, the mathematical model can be adapted for the purpose of getting as close as possible to the reality. However, there are situations in which it is not possible, for example in power systems operation, where an operator could say: “*the voltage in determined bus is good*”, being this kind of information can be interpreted by different operators in different ways. Thus, associating a degree of membership in a determined variation interval, the determination of analysis pattern is made possible.

Sumário

1	Introdução	1
2	Revisão Bibliográfica	3
3	Fundamentação Teórica	9
3.1	Lógica Nebulosa	9
3.2	Conjuntos Nebulosos	11
3.3	Possibilidade vs. Probabilidade	12
3.4	Função de Pertinência	13
3.4.1	Função de Pertinência Sinusoidal	13
3.5	Números Nebulosos	14
3.5.1	Operadores Nebulosos	15
3.6	Seno e Cosseno Nebuloso	16
3.7	Fluxo de Carga	17
3.7.1	Fluxo de Carga Newton-Raphson Convencional - FCNR	17
3.7.2	Fluxo de Carga Newton Fuzzy Sinusoidal - FCNS	21
3.7.3	Fluxo de Carga Sinusoidal Nebuloso - FCSN	21
3.7.4	Fluxo de Carga Sinusoidal Discreto - FCSD	24
4	Tradução de Resultados Numéricos em Lingüísticos	29
4.1	Aplicação da Metodologia	31
4.1.1	Elaboração do Programa Computacional	31

4.1.2	Apresentação dos Algoritmos Computacionais	31
4.1.2.1	FCNR	31
4.1.2.2	FCSN	33
4.1.2.3	FCSD	34
4.1.3	Implementação dos Algoritmos Computacionais	36
5	Resultados e Comentários	39
5.1	Considerações	39
5.1.1	Bancos de Dados	39
5.1.2	Dados de Entrada	39
5.2	Resultados	40
5.2.1	Resultados para o Sistema de 3 Barras	40
5.2.1.1	Tradução dos Resultados Numéricos em Lingüísticos	46
5.2.2	Resultados para IEEE30	52
5.2.3	Resultados para IEEE57	78
6	Considerações Finais	105
6.1	Tradução de Valores Numéricos em Resultados Lingüísticos	105
6.2	Propostas Futuras	105
6.2.1	Controle Automático Utilizando Lógica Nebulosa	105
6.2.2	Estabelecer Perfis para as Variáveis Utilizadas na Operação dos Sistemas	106
A	Modelagem do Transformador	109
B	Banco de Dados e Configuração das Redes	111
B.1	Sistema 30 Barras	112
B.2	Sistema 57 Barras	115
C	Resultados Completos	119
C.1	Sistema 3 barras	120
C.2	Sistema IEEE30 Barras	121

C.2.1	Resultados para o FCNR	121
C.2.2	Resultados para o FCSN	123
C.2.3	Resultados para o FCSD	125
C.3	Sistema IEEE57	127
C.3.1	Resultados para o FCNR	127
C.3.2	Resultados para o FCSN	130
C.3.3	Resultados para o FCSD	133



Lista de Figuras

3.1	Função Sinusoidal	14
3.2	Função Sinusoidal	22
4.1	Termos Lingüísticos	29
4.2	Faixa de Variação	30
4.3	Fluxograma - tradução de resultados numéricos em lingüísticos	38
5.1	Rede de 3 barras	40
5.2	Distribuição de possibilidades para a tensão na barra 2	47
5.3	Análise da queda de tensão na barra 2	48
5.4	Distribuição de possibilidades para o fluxo de potência no ramo 1-3	49
5.5	Análise da queda do fluxo de potência no ramo 1-3	50
5.6	Destaque do fluxo de potência medido no ramo 1-3	51
5.7	Distribuição de possibilidades para a tensão na barra 3	53
5.8	Distribuição de possibilidades para a tensão na barra 4	54
5.9	Análise da variação de tensão na barra 3	55
5.10	Detalhe da variação de tensão na barra 3	56
5.11	Análise da variação de tensão na barra 4	57
5.12	Distribuição de possibilidades para a magnitude de tensão na barra 4	58
5.13	Distribuição de possibilidades para a magnitude de tensão na barra 6	59
5.14	Análise da variação de tensão na barra 4	60
5.15	Destaque da variação de tensão na barra 4	61
5.16	Análise da variação de tensão na barra 6	62

5.17	Destaque da variação de tensão na barra 6	63
5.18	Distribuição de possibilidades para a tensão na barra 27	64
5.19	Distribuição de possibilidades para a tensão na barra 28	65
5.20	Análise da variação de tensão na barra 27	66
5.21	Detalhe da variação de tensão na barra 27	67
5.22	Análise da variação de tensão na barra 28	68
5.23	Análise da variação de tensão na barra 28	69
5.24	Distribuição de possibilidades para o fluxo de potência no ramo 1-3	70
5.25	Análise do aumento do fluxo de potência no ramo 1-3	71
5.26	Destaque do fluxo de potência medido no ramo 1-3	72
5.27	Distribuição de possibilidades para o fluxo de potência no ramo 12-15	73
5.28	Análise do aumento do fluxo de potência no ramo 12-15	74
5.29	Destaque do fluxo de potência medido no ramo 12-15	75
5.30	Distribuição de possibilidades para o fluxo de potência no ramo 28-27	76
5.31	Análise da queda do fluxo de potência no ramo 27-28	77
5.32	Distribuição de possibilidades para a tensão na barra 14	79
5.33	Distribuição de possibilidades para a tensão na barra 15	80
5.34	Análise da variação de tensão na barra 14	81
5.35	Detalhe da variação de tensão na barra 14	82
5.36	Análise da variação de tensão na barra 15	83
5.37	Distribuição de possibilidades para a tensão na barra 7	84
5.38	Distribuição de possibilidades para a tensão na barra 29	85
5.39	Análise da variação de tensão na barra 7	86
5.40	Detalhe da variação de tensão na barra 7	87
5.41	Análise da variação de tensão na barra 29	88
5.42	Magnitude de tensão na barra 44	89
5.43	Magnitude de tensão na barra 45	90
5.44	Análise da variação de tensão na barra 44	91
5.45	Destaque da variação de tensão na barra 44	92

5.46	Distribuição de possibilidades para a tensão na barra 14	93
5.47	Distribuição de possibilidades para a tensão na barra 46	94
5.48	Análise da variação de tensão na barra 14	95
5.49	Destaque da variação de tensão na barra 14	96
5.50	Análise da variação de tensão na barra 46	97
5.51	Distribuição de possibilidades para o fluxo de potência no ramo 4-5	98
5.52	Análise da queda do fluxo de potência no ramo 4-5	99
5.53	Destaque do fluxo de potência medido no ramo 4-5	100
5.54	Distribuição de possibilidades para o fluxo de potência no ramo 24-25	101
5.55	Análise do aumento do fluxo de potência no ramo 24-25	102
5.56	Destaque do fluxo de potência medido no ramo 24-25	103
A.1	Modelo de transformador	109
B.1	Configuração do Sistema IEEE30 Barras	114

Lista de Tabelas

4.1	Termos qualificativos para faixas de variações do grau de pertinência	30
5.1	Dados de barras	40
5.2	Dados de ramos	40
5.3	Magnitudes e ângulos - FCNR	41
5.4	Distribuição de possibilidades para potência ativa(pu)	41
5.5	Distribuição de possibilidades para potência reativa(pu)	41
5.6	Magnitudes e ângulos nas barras para o FCNS	42
5.7	Fluxo ativo (pu) nos ramos	42
5.8	Fluxo reativo (pu) nos ramos	42
5.9	Potências ativa e reativa (pu) geradas nas barras	43
5.10	Perdas ativas na transmissão(pu)	43
5.11	Magnitudes e ângulos das tensões nodais	44
5.12	Fluxos ativos máximos e mínimos nos ramos (pu)	44
5.13	Fluxos reativos máximos e mínimos nos ramos (pu)	44
5.14	Potências ativa e reativa máximas e mínimas na barras (p.u.)	44
5.15	Perdas máximas e mínimas na transmissão (pu)	45
5.16	Fluxos ativos nos ramos (pu)	45
5.17	Fluxos reativos nos ramos (pu)	45
5.18	Potências ativa e reativa geradas nas barras (pu)	45
5.19	Perdas na transmissão (pu)	46
5.20	Fluxos de potência ativa (MW)	52

5.21 Fluxos de potência ativa (MW)	78
B.1 Dados de barras para o sistema 30 barras	112
B.2 Dados dos ramos para o sistema 30 barras (pu)	113
B.3 Dados de barras para o sistema 57 barras	115
B.4 Dados dos ramos para o sistema 57 barras (pu)	117
C.1 Tensões e ângulos para o FCNR	120
C.2 Potências ativa e reativa (pu) geradas nas barras	120
C.3 Fluxos de potência ativa (pu) nos ramos	120
C.4 Fluxos de potência reativa (pu) nos ramos	120
C.5 Perdas ativas (pu) na transmissão	120
C.6 Magnitudes e ângulos das tensões para FCNR	121
C.7 Potências ativa e reativa geradas nas barras para FCNR	121
C.8 Fluxos de potências ativa e reativa para FCNR	122
C.9 Perdas ativas na transmissão para FCNR	122
C.10 Magnitudes e ângulos das tensões para FCSN	123
C.11 Potências ativa e reativa geradas nas barras para FCSN	123
C.12 Fluxos de potências ativa e reativa para FCSN	124
C.13 Perdas ativas na transmissão para FCSN	124
C.14 Potências ativa e reativa geradas nas barras para FCSD	125
C.15 Fluxos de potências ativa e reativa para FCSD	126
C.16 Perdas ativas na transmissão para FCSD	126
C.17 Magnitudes e ângulos das tensões para FCNR	127
C.18 Potências ativa e reativa geradas nas barras para FCNR	127
C.19 Fluxos de potências ativa e reativa geradas nas barras para FCNR	128
C.20 Perdas ativas na transmissão para FCNR	129
C.21 Magnitudes e ângulos das tensões para FCSN	130
C.22 Potências ativa e reativa nas barras para o FCSN	130
C.23 Fluxos de potências ativa e reativa para FCSN	131

C.24 Perdas ativas na transmissão para FCSN	132
C.25 Fluxos de potências ativa e reativa para FCSD	133
C.26 Potências ativa e reativa geradas nas barras para o FCSD	134
C.27 Perdas ativas na transmissão para FCSD	135

Capítulo 1

Introdução

A implementação de algoritmos computacionais para realizar o fluxo de potência (fluxo de carga) em redes de energia elétrica, é útil tanto no planejamento como na análise da operação das redes elétricas, tendo como objetivos obter o estado da rede (magnitude e ângulo das tensões nodais) e os fluxos de potência ativa e reativa nas ligações.

Para realizar as simulações com o fluxo de carga, é necessário conhecer os dados do sistema para o qual se deseja estimar tensões, fluxos de potência, potências geradas e perdas. Alguns destes dados são estimados facilmente, como por exemplo, as impedâncias das linhas de transmissão que dependem principalmente do material de que são constituídas e da sua geometria. Estes elementos não apresentam um grande grau de imprecisão quando comparados com as potências nas barras, já que estas podem variar dependendo de períodos, como em sistemas de distribuição e de transmissão onde as potências variam ao longo do dia.

Com a existência destas imprecisões, utiliza-se da experiência de engenheiros para se fazer estimativas e assim considerar os dados do sistema constantes, para que se possa efetuar tais simulações.

Em 1965, Lofti Zadeh desenvolveu a Teoria dos Conjuntos Nebulosos (*Fuzzy Sets*) e em 1978, a Teoria das Possibilidades, criando uma base teórica que possibilita inserir nas simulações as imprecisões presentes nos sistemas elétricos de potência.

Algumas publicações encontradas, como [3, 7–9], utilizam as teorias desenvolvidas por Zadeh para elaborar fluxos de carga *fuzzy* para os sistemas elétricos de potência. Estes fluxos de carga *fuzzy* utilizam funções de pertinência para representar números nebulosos [13].

Este trabalho de pesquisa tem como objetivo promover uma nova aplicação da lógica nebulosa no desenvolvimento de metodologia de análise de desempenho de redes de energia elétrica de qualquer dimensão, sendo estimulada pela possibilidade de aplicar os conceitos de conjuntos nebulosos para traduzir resultados numéricos em lingüísticos. Para representar os números nebulosos é utilizada a função de pertinência sinusoidal (forma de sino) também utilizada em [8]. Com esta função, os cálculos nebulosos são efetuados com operadores nebulosos,

não necessitando de técnicas de cortes de nível como proposto em [9].

Embora diferentes modelos matemáticos possam ser adaptados com a principal finalidade de se obter resultados o mais próximos da realidade, há situações onde isto não é possível ou então, o modelo desenvolvido é muito complexo e por vezes inviável do ponto de vista de tempo computacional. Isto acontece na operação dos sistemas de energia elétrica, onde um operador com certa experiência poderá afirmar “o fluxo de potência ativa em um determinado ramo está alto”, ou “a tensão em determinada barra está boa”, sendo que informações deste tipo podem ser interpretadas de diferentes maneiras por diferentes pessoas. Assim, associando-se um grau de pertinência em um determinado intervalo de variação, viabiliza-se a determinação de padrões de análise.

No Capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica sobre o assunto comentando os últimos trabalhos realizados sobre o tema bem como propostas de melhorias realizadas por alguns pesquisadores.

No Capítulo 3 faz-se uma breve revisão sobre a teoria de *Fuzzy Sets* e a teoria de Fluxo de Carga.

No Capítulo 4 é apresentada a metodologia utilizada para traduzir resultados numéricos em resultados linguísticos.

No Capítulo 5 são apresentados os testes realizados.

No capítulo 6 encontram-se as considerações finais acerca deste trabalho.

O *Apêndice A* traz o modelo de transformador utilizado no programa computacional.

O *Apêndice B* apresenta os dados das redes utilizadas e suas respectivas configurações.

No *Apêndice C* estão todos os resultados completos para os fluxos de carga (FCNR, FCSN e FCSD).

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Nos últimos anos, com o crescente interesse na aplicação da teoria de conjuntos nebulosos aos problemas de sistema de potência, é possível encontrar um significativo número de publicações sobre o assunto. Como em qualquer tópico relativamente novo, é necessário prestar atenção à compreensão dos princípios básicos da teoria e à identificação dos problemas apropriados que podem ser solucionados utilizando esta metodologia.

Em [12] é apresentada uma síntese de recentes publicações para aplicação da teoria de conjuntos nebulosos e os procedimentos básicos de métodos baseados nesta teoria para resolver problemas específicos dos sistemas de potência.

Devido ao número de publicações no assunto, o problema do controle de sistemas de potência é a área mais popular para aplicações baseadas na teoria de conjuntos nebulosos.

Os conjuntos nebulosos podem ter um papel importante em problemas de otimização da operação e planejamento de sistemas de potência. Na referência [12] é citado que algumas publicações propõem o uso de conjuntos nebulosos para controlar objetivos e restrições. Este esquema não somente flexibiliza a formulação do problema, mas se aplicado corretamente, melhora a eficiência computacional.

Os sistemas elétricos estão sujeitos a variações de potência, que em alguns casos são diárias, ou seja, há variações da carga durante os períodos do dia. Os parâmetros mais significativos em uma avaliação adequada de potência são os pontos de carga e o índice de corte de carga em todo o sistema. Muitas áreas têm dificuldade em interpretar os cálculos de índice de corte de carga, pois modelos existentes nem sempre incluem aspectos realistas e práticos das condições de operação. Em [16] é utilizada a formulação da programação linear para solucionar o problema, porém uma formulação simples é inadequada para satisfazer os objetivos e restrições de sistemas realistas. Assim, as incertezas nas cargas e nas gerações são modeladas como números nebulosos. O índice de corte de carga é calculado usando uma programação linear *fuzzy*. Os resultados computacionais são otimizados nos termos da minimização da função objetivo comparado à aplicação de possibilidades.

No processo de planejamento, tratar do prognóstico é muito complexo e sempre houve a necessidade de uma ferramenta que pode ser usada no caso das incertezas. Da experiência reconhece-se agora que aplicações probabilísticas não podem modelar cada tipo de incerteza [16]. A teoria de conjuntos nebulosos (*fuzzy sets*) fornece uma vantagem em modelar sistemas que têm natureza quantitativa.

Na formulação tradicional, as soluções estão no limite das restrições de modo que pequenos desvios das linearidades resultam em soluções fora da região de possibilidades. A finalidade da introdução de conjuntos nebulosos é achar uma solução apropriada a um modelo que represente fielmente as incertezas e os objetivos inerentes na prática de um problema de controle [16].

Devido às possibilidades limitadas de transmissão para atender acréscimos nas cargas, a distribuição de potência reativa recebeu uma atenção crescente nos últimos anos, pois qualquer mudança na configuração ou na demanda do sistema pode resultar no alto ou baixo perfil de tensão. No intuito de manter o desejado nível de tensão e fluxo de reativo sob várias condições de operação e configurações do sistema, os operadores dos sistemas de potência podem utilizar ferramentas de controle tais como: trocar fontes de potência reativa, alterar tensão gerada e/ou ajustar transformadores com tap variável. Por um ajuste ótimo destes controles, a redistribuição da potência reativa minimiza as perdas na transmissão. Vários métodos têm surgido na literatura [1], [2] e [10], tendo como intenção a descoberta do ajuste ótimo das variáveis de controle que eliminará a violação de tensão e minimizará perdas de potência ativa em um sistema elétrico de potência. No passado, cada aplicação proposta de formulação não-linear era uma solução para este problema. Outro [15] sugere a possibilidade de linearização das restrições ao manter uma função objetiva não-linear. Recentemente, a aplicação de programação linear tem se tornado dominante na área com função objetivo separável ou não, com soluções satisfatórias dentro de um razoável tempo computacional. A programação linear é incluída por ser confiável e com convergência mais rápida do que qualquer aplicação alternativa.

Uma desvantagem comum em aplicações anteriores foi a fixação do valor da carga na formulação da programação linear, o que não corresponde à realidade, onde as incertezas nos dados são frequentemente encontradas [2]. Se para o dado em consideração, alguns valores são conhecidos por ocorrer em maior frequência do que outros, então a natureza desta incerteza é obviamente probabilística. Assim, uma variável aleatória pode ser designada para cada dado e um modelo probabilístico poderá ser usado. De qualquer forma, um conhecimento semelhante não é sempre eficaz, e a informação pertinente pode ser limitada por algumas declarações linguísticas sobre o dado (por exemplo: a carga na barra i é aproximadamente 15 MVA; a carga na barra j é principalmente do tipo industrial). Este tipo de dado não é nem determinístico e nem probabilístico. A situação é encontrada com maior frequência em previsões de carga por série histórica, e decisões humanas são envolvidas em um ambiente que é sempre flutuante. Este tipo de dado é dito ser *fuzzy* e a natureza da incerteza é descrita como probabilística.

A teoria de possibilidades que é baseada na teoria de conjuntos nebulosos foi inicialmente

introduzida em [20]. A primeira tentativa para aplicar conceitos *fuzzy* em análise de decisão em sistemas de potência foi em 1979 [4]. Desde esse tempo, conjuntos nebulosos têm sido aplicados a diferentes áreas de análise do sistema elétrico de potência [12].

Há alguns anos, conjuntos nebulosos foram usados nos modelos do controle de perfil de tensão e nas funções objetivos do problema de controle de potência reativa/tensão, e um método de programação linear foi usado para resolver a formulação baseada em conjuntos nebulosos [15]. O problema do controle reativo/tensão é de interesse particularmente importante para a área de transmissão de energia elétrica a longas distâncias. O problema prático do controle da tensão consiste em objetivos múltiplos e em restrições flexíveis (modelagem *fuzzy*). Aplicações baseadas em sistemas especialistas são propostas para incorporar estas considerações práticas. Entretanto, resultados computacionais numéricos requeridos são inadequados dentro da estrutura de sistema especialista. Em [15], os objetivos múltiplos e as restrições flexíveis são modelados usando conjuntos nebulosos. Sob esta definição, o problema de otimização *fuzzy* é reformulado como um problema modelo de programação linear. A nova função objetivo representa uma combinação entre os objetivos e as restrições flexíveis. Deste modo, uma aplicação de programação linear *fuzzy* é proposta como um método de controle de potência reativa/tensão. Um algoritmo padrão da programação linear pode ser aplicado incorporando uma formulação *fuzzy*.

A inserção de sistemas especialistas foi proposta em [18], onde uma aplicação flexível para coordenar o controle de tensão/potência reativa baseada em conjuntos nebulosos foi apresentada. A estratégia do controle é expressa por regras simples, que medem a proximidade do estado do sistema a determinadas circunstâncias de operação, e por equações lineares utilizadas para obter os modelos eficazes para o controle. As ações desejadas do controle são determinadas considerando diversos critérios ao mesmo tempo.

Na publicação [18] a aplicação de conjuntos nebulosos para o desenvolvimento de um controlador de tensão via potência reativa, foi analisada em diversos casos de um sistema teste, sendo que os resultados simulados mostraram algumas vantagens como, por exemplo, controle coordenado de dispositivos disponíveis para controle de tensão, que é conseguido de modo que o controle da tensão conduza o sistema a condições de operações mais seguras; operação de dispositivos de controle de tensão é provou que é possível combinar regras heurísticas e equações lineares; variáveis linguísticas podem ser mudadas pelo ajuste dos parâmetros usando função de pertinência.

Já a referência [1] usou conjuntos nebulosos como uma ferramenta para controle do fluxo de potência reativa. O objetivo foi minimizar a perda de potência ativa e o problema foi modificado dentro de uma formulação *max-min*. As perdas de transmissão foram expressas nos termos de incrementos da tensão relacionando as variáveis de controle, como por exemplo, posições do tap dos transformadores e fontes de potência reativa, por meio de uma matriz Jacobiana modificada. Esta formulação específica do problema não requer a inversão da matriz Jacobiana e preserva o tempo e a memória computacional. A função objetivo e as restrições são modeladas por conjuntos nebulosos e é estabelecido um problema de otimização linear *fuzzy*. O espaço solução neste caso é definido como a interseção dos conjuntos nebulosos que

descrevem as restrições e a função objetivo. Cada solução é caracterizada por um parâmetro que determina o grau de satisfação para a solução. A solução ótima é o valor máximo dentre os resultados que satisfazem o parâmetro.

Ainda com relação à publicação [1], verificou-se que para casos específicos a dificuldade em modelar as variáveis pode resultar em uma solução inviável e o processo de otimização pode não identificar uma solução ótima que satisfaça as restrições de operação. Pela incerteza de determinadas variáveis, o objetivo é aumentar a precisão do caso prático que refletiria essencialmente na intuição dos operadores em operar um sistema de grande porte. A programação linear é uma alternativa apropriada para procedimentos tradicionais de controle ótimo de potência reativa porque tem a habilidade de minimizar perdas de potência ativa, melhorar o perfil de tensão e ao mesmo tempo representar os ajustes práticos para a operação de um sistema de potência. O autor ainda mostra que embora os limites sejam imprecisos, força-se a solução para permanecer dentro dos limites maximizando o parâmetro. Esta distinção torna a técnica *fuzzy* mais apropriada para modelar a tolerância, ao invés de se expandir os limites. Nesta consideração, ajustando a região prática, pode-se permitir que algumas tensões críticas aumentem além de seus limites a fim de identificar um estado de operação mais apropriado. Além disso, o modelo nebuloso discrimina valores diferentes das variáveis atribuindo valores elevados de pertinência às soluções desejadas e valores baixos a soluções menos desejáveis [1]. Esta importante característica da aplicação baseada em conjuntos nebulosos acomoda modelos mais realistas para caracterizar o comportamento de variáveis pertinentes, permitindo desse modo que realcem os métodos de solução determinísticas usados para resolver problemas reais.

Embora a solução acima tenha usado conjuntos nebulosos para refletir circunstâncias mais realistas, eles não trataram a incerteza na carga e assumiram valores fixos para as cargas. Análises de fluxo de carga *fuzzy* incorporando incertezas na carga foram introduzidas em [9]. O resultado do fluxo de carga *fuzzy* foi um conjunto de tensões *fuzzy*, ângulos, fluxos ativos e reativos e perdas, bem como potências ativas e reativas geradas nas barras. A referência [10] conseguiu usar o modelo de fluxo de carga *fuzzy* linearizado (modelo DC), que foi desenvolvido em [9], para modelar incertezas na demanda de potência e na otimização do custo de geração de potência. Uma proposta para solucionar o problema do fluxo de potência com incertezas no valor da carga foi descrito em [17]. O método foi baseado na aritmética intervalar o qual foi visto como um caso especial de conjuntos nebulosos. Os valores dentro do intervalo designaram uma pertinência igual a um (1), e pertinência zero (0) foi considerada para valores fora do intervalo.

Já em [2] é proposta uma solução para o problema da otimização de tensão via potência reativa adotado dentro da consideração da incerteza associada com a demanda de potência reativa. O objetivo é minimizar a perda de potência ativa dentro das várias condições de carga. Foram propostas duas maneiras para resolver este problema. A primeira foi para testar vários valores de cargas dentro de uma escala específica, otimizar cada caso e preparar um conjunto de orientações para controle ótimo. Esta opção se tornou dispendiosa e levou tempo, no qual algumas características essenciais dos dados não foram adotados dentro da consideração. Um método de análise mais lógico foi considerado, e este depende da teoria de

conjuntos nebulosos para analisar os diferentes cenários de carga.

Incertezas nos dados são frequentemente encontradas na medida em que lidamos com situações reais. Na maioria dos casos, quando os dados disponíveis são insuficientes para a solução do problema, as declarações linguísticas podem ser usadas para descrever a validade dos dados. A incerteza neste tipo de modelo é baseado principalmente na ambiguidade intrínseca do que na frequência da avaliação dos dados sob consideração. Do mesmo modo é adequado modelar a incerteza por meio de conjuntos nebulosos. Previsões de demandas futuras é uma área onde esse tipo de incerteza pode ser encontrada. A formulação proposta de otimizar o problema de controle de tensão/potência reativa indica que o modelo de cargas *fuzzy* permitirá operar o sistema mais economicamente num ambiente incerto.

É importante ressaltar que o modelo de *fuzzy sets* não é um modelo substituto da aplicação probabilística. Cada modelo é usado para descrever um diferente tipo de incerteza, e pode até ser possível incorporar ambos modelos em uma mesma aplicação.

Capítulo 3

Fundamentação Teórica

3.1 Lógica Nebulosa

A lógica nebulosa (*fuzzy logic*) é um recurso matemático que suporta os modos de raciocínio que são aproximados ao invés de exatos, ou seja, possibilita modelar de modo aproximado o raciocínio, tentando imitar a habilidade humana de tomar decisões racionais em um ambiente de incerteza e imprecisão. Derivada do conceito de conjuntos nebulosos (*fuzzy sets*), a lógica nebulosa constitui a base para o desenvolvimento de métodos e algoritmos de modelagem e controle de processos, permitindo a redução da complexidade e da implementação de problemas, sendo um meio para solução de problemas de controle até então intratáveis por técnicas clássicas. Ela difere dos sistemas lógicos em suas características e seus detalhes. Nesta lógica, o raciocínio exato corresponde a um caso limite do raciocínio aproximado, sendo interpretado como um processo de composição de relações nebulosas.

Na lógica nebulosa, o valor verdade de uma proposição pode ser um subconjunto nebuloso de qualquer conjunto parcialmente ordenado, ao contrário dos sistemas lógicos binários, onde o valor verdade só pode assumir dois valores: verdadeiro (1) ou falso (0). Nos sistemas lógicos multivalores, o valor verdade de uma proposição pode ser ou um elemento de um conjunto finito, num intervalo, ou uma álgebra booleana [19]. Na lógica nebulosa, os valores verdade são expressos lingüisticamente (verdade, muito verdade, não verdade, falso, muito falso), onde cada termo lingüístico é interpretado como um subconjunto nebuloso do intervalo unitário. Outras características da lógica nebulosa podem ser resumidas da seguinte maneira: nos sistemas lógicos binários, os predicados são exatos (par, ímpar, maior que, menor que), ao passo que na lógica nebulosa os predicados são nebulosos (alto, baixo). Nos sistemas lógicos clássicos, o modificador mais utilizado é a negação, enquanto que na lógica nebulosa uma variedade de modificadores de predicados são possíveis (muito, mais ou menos). Estes modificadores são essenciais na geração de termos lingüísticos, tais como: muito alto, mais ou menos perto, etc. Deste modo, a decisão de uma máquina não se resume apenas a um “sim” ou um “não”, mas também tem decisões abstratas, sendo a lógica nebulosa uma técnica

inteligente que fornece um mecanismo para manipular informações imprecisas, que permite inferir uma resposta aproximada para uma questão baseada em um conhecimento que é in-exato, incompleto ou não totalmente confiável [19]. Enquanto que na lógica clássica existem somente os quantificadores existenciais e universais, a lógica nebulosa admite uma ampla variedade de quantificadores como: pouco, vários, usualmente, frequentemente, etc. Devido às suas características intrínsecas, a lógica nebulosa é capaz de incorporar tanto o conhecimento objetivo (a partir de dados numéricos) quanto o conhecimento subjetivo (a partir de informações linguísticas). Por exemplo, “aquele homem é alto ou baixo?” Um sim ou um não como resposta a esta questão é, na maioria das vezes, incompleta. Na verdade, entre a certeza de ser e a certeza de não ser, existem infinitos graus de incerteza. Esta imperfeição intrínseca à informação representada numa linguagem natural, vinha sendo tratada matematicamente com o uso da teoria das probabilidades [5] .

O conceito de nebulosidade é frequentemente confundido com o de probabilidade. Tem-se uma visão de que conjuntos nebulosos é uma outra forma de abordagem da teoria da probabilidade. A teoria de conjuntos nebulosos fornece meios para representar incertezas. É fato que a teoria da probabilidade foi a primeira ferramenta a representar incertezas em modelos matemáticos. Contudo, a lógica nebulosa tem se mostrado mais adequada para tratar imperfeições da informação do que a teoria da probabilidade. A probabilidade, no contexto da lógica clássica, é um valor numérico ou um intervalo [6]. Na lógica nebulosa existe a opção de se empregar probabilidades linguísticas (provável, altamente provável, improvável), interpretadas como números nebulosos e manipulados pela aritmética nebulosa. Também em contraste com a lógica modal clássica, o conceito de possibilidade é interpretado utilizando-se subconjuntos nebulosos no universo dos reais.

Algumas formas da incerteza não são aleatórias e portanto não são adequadamente modeladas pela teoria da probabilidade. Na verdade, pode-se discutir que a importância predominante da incerteza associada com sistemas complexos é de natureza não aleatória. A teoria de conjuntos nebulosos é uma excelente ferramenta para modelar o tipo de incerteza associado com a intuição, imprecisão, ou falta de informação a respeito de um elemento particular do problema.

De forma mais objetiva, podemos definir lógica nebulosa como sendo uma ferramenta capaz de capturar informações vagas, em geral descritas em uma linguagem natural e convertê-las para um formato numérico, de fácil manipulação pelos computadores de hoje em dia.

O princípio da incompatibilidade estabelecido por Zadeh [6], explica o porquê da necessidade de uma teoria de sistemas nebulosos. O princípio declara, essencialmente, que à medida que a complexidade de um sistema aumenta, reduz-se a habilidade de se fazer indicações precisas e ainda significantes sobre seu comportamento, além de a imprecisão se transformar em característica exclusiva, e isto sugere uma correlação entre complexidade e imprecisão.

Aprendendo-se mais sobre um sistema, sua complexidade diminui e a compreensão aumenta. Quando a complexidade diminui, a precisão disposta pelos métodos computacionais torna-se mais útil na modelagem do sistema. Para sistemas menos complexos, que envolvem poucas incertezas, expressões matemáticas oferecem descrições precisas do seu comportamen-

to. Já os sistemas mais complexos necessitam de meios poderosos e eficazes para reduzir alguma incerteza.

A lógica nebulosa é baseada na maneira em que o cérebro trata a informação incorreta. Os sistemas nebulosos combinam conjuntos nebulosos com regras nebulosas para processamento de informações globalmente complexas não-lineares. Os sistemas nebulosos são estruturados pela estimação numérica.

Visto de uma ampla perspectiva, a lógica nebulosa é parte integrante de uma área emergente da pesquisa, chamada de *soft computing*, um termo inventado por Zadeh [6]. Acredita-se que o fator mais importante que fundamenta o crescimento marcado pela inteligência da máquina (artificial), hoje em dia, é o uso da *soft computing* para imitar a habilidade eficaz da mente humana em empregar particularidades aproximadas que exigem modalidades de raciocínio.

Ao contrário da tradicional *hard computing*, cujos principais objetivos são precisão e certeza, *soft computing* tolera imprecisão e incerteza.

Conceitos da teoria de conjuntos nebulosos foram introduzidos primeiramente para resolver problemas de tomada de decisão em sistemas de potência [4]. Entretanto, o interesse substancial de aplicações na área de potência é mais recente [12].

3.2 Conjuntos Nebulosos

A idéia básica de conjuntos nebulosos está bem fundamentada na teoria desenvolvida por L. A. Zadeh [19] que consiste na agregação da precisão inerente ao modelo matemático de conjuntos clássicos com a imprecisão do mundo real.

Um conjunto nebuloso pode ser visto como uma generalização de um conjunto clássico, possibilitando atribuir um grau de pertinência para cada elemento e portanto, a função de pertinência do conjunto nebuloso mapeia cada elemento do universo de discussão a seu espaço de escala, que na maioria dos casos é assumido como um intervalo fechado $[0 \ 1]$.

A principal diferença entre conjuntos clássicos e conjuntos nebulosos consiste em que o primeiro tem sempre função de pertinência única (exclusiva) enquanto o segundo tem um número infinito de funções de pertinências que o podem representar, permitindo que sistemas nebulosos sejam ajustados para a máxima utilidade em uma dada situação.

Seja um conjunto A definido sobre um universo X , o qual é caracterizado pela função de pertinência $\mu_A(x)$ a qual toma valores no intervalo $[0 \ 1]$. Uma função de pertinência fornece uma medida do grau de similaridade de um elemento em X ao conjunto nebuloso. Assim, A é definido como conjunto nebuloso e $\mu_A(x)$ o grau de pertinência de x em A . Quanto mais próximo seja $\mu_A(x)$ de 1, mais x pertencerá a A . É claro que A pode ser considerado um subconjunto de X que não tem limites definidos. Tem-se:

$$A = \{(x, \mu_A(x)), x \in X\} \quad (3.1)$$

Quando X é um conjunto finito (discreto) $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, um conjunto nebuloso sobre X é expresso como:

$$A = \mu_A(x_1)/x_1 + \mu_A(x_2)/x_2 + \dots + \mu_A(x_n)/x_n \quad (3.2)$$

$$A = \sum_{i=1}^n \mu_A(x_i)/x_i \quad (3.3)$$

Quando X é um conjunto não-finito (contínuo), o conjunto nebuloso sobre X é expresso como:

$$A = \int_X \mu_A(x)/x \quad (3.4)$$

Os conjuntos clássicos indicam se um ponto pertence ou não a um universo preestabelecido e os conjuntos nebulosos trazem uma complementação a este tipo de representação e permitem ampliar as tomadas de decisões, introduzindo qualificadores aos quantificadores, como por exemplo, “nível de tensão elevado”.

3.3 Possibilidade vs. Probabilidade

Desde que Zadeh propôs o conceito de conjuntos nebulosos em 1965, os relacionamentos entre a teoria da probabilidade e a teoria de conjuntos nebulosos são discutidos. Ambas as teorias parecem ser similares no sentido que ambas se referem a algum tipo de incerteza e apresentam valores intervalares entre $[0 \ 1]$.

A comparação entre a teoria da probabilidade e a teoria de conjuntos nebulosos é difícil por duas razões:

1. A comparação poderia se feita em níveis muito diferentes, como por exemplo, matematicamente e lingüísticamente;
2. A teoria de conjuntos nebulosos não apresenta uma estrutura matemática excepcionalmente definida, tal como a álgebra booleana ou a lógica binária. Deste modo, a teoria de conjuntos nebulosos pode ser comparada à teoria de sistemas lógicos multi-valores.

A teoria da possibilidade tem como enfoque a imprecisão, que é intrínseca em linguagem natural e é proposto para ser mais “possibilístico” do que probabilístico. Consequentemente, a variável é usada em um sentido mais lingüístico do que matemático. Esta é a razão pela qual a terminologia e o simbolismo da teoria da possibilidade diferem em alguns pontos da teoria de conjuntos nebulosos. A fim de facilitar o estudo da teoria da possibilidade, é comum usar a terminologia possibilística mas sempre apresentando uma correspondência à teoria de conjuntos nebulosos.

Para a teoria da probabilidade tem-se o seguinte exemplo, “é provável que amanhã eu vá ao cinema”. O exemplo faz uma previsão futura sobre um ou vários acontecimentos que, na realidade, não se pode prever, pois é apenas uma possível hipótese para o acontecimento, podendo-se ir ou não ao cinema, porém sem qualquer garantia sobre o que vai acontecer. Este tipo de situação ou experiência é chamada de aleatória.

3.4 Função de Pertinência

A função de pertinência $\mu_A(x)$ estabelece a relação entre o elemento x de um universo X e o conjunto nebuloso A .

A função pode assumir valores que variam de zero à unidade, diferindo da função característica utilizada para definir conjuntos clássicos, a qual só pode assumir os valores unitário ou nulo, onde o elemento pertence ou não ao referido conjunto. Assim, pode-se escrever:

$$\mu_A : X \rightarrow [0 \ 1]$$

onde a função μ_A é responsável pelo mapeamento de $x \in X$ com relação a A .

As funções de pertinência podem ser representadas através de vários tipos de funções gráficas: triangular, trapezoidal, exponencial, entre outras. A escolha do tipo de função depende da aplicação na qual será utilizada. Neste trabalho, é utilizada a função de pertinência sinusoidal (forma de sino) [8], descrita a seguir.

3.4.1 Função de Pertinência Sinusoidal

A função de pertinência sinusoidal é regida pela equação (3.5) e graficamente mostrada na figura (3.1).

$$A(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x-m_A}{\alpha_A}\right)^2} \quad (3.5)$$

A equação também é representada por $A(m_A, \alpha_A)$, onde m_A corresponde ao valor de maior grau ($A(m_A) = 1$) e α_A é o grau de incerteza da função, sendo $A(m_A + \alpha_A) = A(m_A - \alpha_A) = 0,5$.

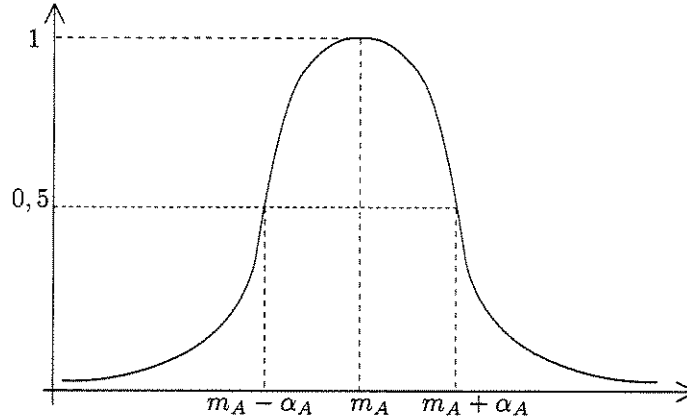


Figura 3.1: Função Sinusoidal

Por necessitar de somente dois valores (m_A, α_A) para ser definida, a função sinusoidal permite maior facilidade na execução dos cálculos nebulosos [8].

3.5 Números Nebulosos

Em certas aplicações, determinados dados não são nem determinísticos nem probabilísticos, como por exemplo, “o fluxo de potência no ramo 1-3 está muito alto”. Esta terminologia é utilizada com frequência pelos operadores dos sistemas de energia elétrica e a “quantificação” deste tipo de informação, através de números nebulosos, permite que dados imprecisos sejam tratados através de técnicas conhecidas tais como fluxo de carga. Números Nebulosos modelam quantidades imprecisas, as quais tendem a estar sempre presentes em sistemas complexos.

Na literatura [6,13] não há uma única definição de número nebuloso e são apresentados diferentes tipos de funções de pertinência (triangular, trapezoidal, sinusoidal, etc).

Um número nebuloso $\mathbf{A}$ pode ser definido como um conjunto nebuloso, no espaço dos números reais $\mathbf{R}$, cuja função de pertinência é contínua ou contínua por partes e que satisfaz as seguintes condições:

$$A(x) : (-\infty, +\infty) \rightarrow [0, 1], x \in \mathbf{R}$$

$$\exists m \in \mathbf{R} \text{ tal que, } A(m) = 1$$

$$A \text{ é não decrescente em } (-\infty, m]$$

$$A \text{ é não crescente em } [m, +\infty)$$

A função dada pela expressão (3.5) é um número nebuloso.

3.5.1 Operadores Nebulosos

Sejam os números nebulosos representados por $A(m_A, \alpha_A)$ e $B(m_B, \alpha_B)$, com os quais podem ser efetuadas as seguintes operações matemáticas:

- adição

$$C(m_C, \alpha_C) = A \oplus B \quad (3.6)$$

$$m_C = m_A + m_B \quad \alpha_C = \alpha_A + \alpha_B$$

- subtração

$$D(m_D, \alpha_D) = A \ominus B \quad (3.7)$$

$$m_D = m_A - m_B \quad \alpha_D = |\alpha_A - \alpha_B|$$

Para a multiplicação são propostos dois tipos de operadores, denominados de função faixa estreita e função faixa larga [8]:

- função faixa estreita

$$E(m_E, \alpha_E) = A \otimes B \quad (3.8)$$

$$m_E = m_A \cdot m_B \quad \alpha_E = \alpha calc(2)$$

onde $\alpha calc(2)$ é o segundo elemento do vetor:

$$\alpha calc(2) = ord[| m_E - ((m_A - \alpha_A) \cdot (m_B - \alpha_B)) |, | m_E - ((m_A + \alpha_A) \cdot (m_B - \alpha_B)) |, \dots \\ | m_E - ((m_A - \alpha_A) \cdot (m_B + \alpha_B)) |, | m_E - ((m_A + \alpha_A) \cdot (m_B + \alpha_B)) |]$$

ord é a função de ordenação do vetor em ordem crescente.

- função faixa larga

$$E(m_E, \alpha_E) = A \otimes B \quad (3.9)$$

$$m_E = m_A \cdot m_B \quad \alpha_E = \alpha_{calc}(3)$$

onde $\alpha_{calc}(3)$ é o terceiro elemento do vetor:

$$\alpha_{calc}(3) = ord[| m_E - ((m_A - \alpha_A) \cdot (m_B - \alpha_B)) |, | m_E - ((m_A + \alpha_A) \cdot (m_B - \alpha_B)) |, \dots \\ | m_E - ((m_A - \alpha_A) \cdot (m_B + \alpha_B)) |, | m_E - ((m_A + \alpha_A) \cdot (m_B + \alpha_B)) |]$$

Pode-se constatar que o parâmetro α tem diferentes comportamentos com relação aos fluxos e perdas nos ramos e às potências geradas nas barras. Tal fato é devido às expressões para o cálculo destas variáveis possuírem diferentes quantidades de multiplicações [8]. A referência [13] comenta que a obtenção de uma função que represente operações de multiplicação nem sempre é possível. Operações consecutivas com números nebulosos impõem restrições pois, da mesma maneira como ocorrem erros em processamentos iterativos com números decimais, o mesmo ocorre com os números nebulosos e com maior intensidade [13].

Constatou-se [8] que o problema seria resolvido se o valor de α fosse restringido. Assim, para os cálculos dos fluxos nos ramos utiliza-se a função que restringe o α durante os cálculos (função faixa estreita) e para as perdas na transmissão e as potências geradas nas barras, utiliza-se a função que permite ao α assumir valores um pouco maiores durante os cálculos (função faixa larga).

3.6 Seno e Cosseno Nebuloso

A necessidade de definir um seno e um cosseno nebuloso deve-se ao fato de ao se executar os cálculos de fluxos de potência nos ramos, os valores obtidos não serem satisfatórios quando é utilizada a metodologia convencional [8]. Deste modo, são executados os cálculos de $sen(\theta_m, \alpha_\theta)$ e $cos(\theta_m, \alpha_\theta)$ de forma aproximada, calculando-se o cosseno ou o seno para o valor mínimo do ângulo ($sen(\theta_m - \alpha_\theta)$) e para o valor máximo ($sen(\theta_m + \alpha_\theta)$), fazendo-se uma média dos desvios destes valores com relação ao valor calculado ($sen(\theta_m)$), tomando este valor como o valor de α para a operação em questão, como mostrado a seguir:

$$\theta_{max} = \theta_m + \alpha_\theta \quad (3.10)$$

$$\theta_{min} = \theta_m - \alpha_\theta$$

$$\text{sen}(\theta_m, \alpha_\theta) = (m_{final}, \alpha_{final}) \quad (3.11)$$

onde

$$m_{final} = \text{sen}(\theta_m) \quad (3.12)$$

$$\alpha_{final} = [| \text{sen}(\theta_{max}) | - | \text{sen}(\theta_m) |] + [| \text{sen}(\theta_m) | - | \text{sen}(\theta_{min}) |] / 2$$

Para o cosseno adota-se o mesmo procedimento.

3.7 Fluxo de Carga

O cálculo de fluxo de carga consiste essencialmente na obtenção das condições de operação (tensões, fluxos de potência) de uma rede de energia elétrica em função da sua topologia e dos níveis de demanda e geração de potência. O fluxo de carga é, em geral, realizado utilizando-se métodos computacionais desenvolvidos especialmente para a resolução de equações e inequações algébricas que correspondem ao modelo estático da rede.

A seguir apresenta-se uma síntese da metodologia para Fluxo de Carga Newton-Raphson convencional (FCNR), já que o mesmo pode ser encontrado com detalhes em [11], e também é apresentada a metodologia para o Fluxo de Carga Newton Sinusoidal (FCNS) desenvolvida em [8].

3.7.1 Fluxo de Carga Newton-Raphson Convencional - FCNR

O FCNR consiste em resolver um sistema de equações através do método iterativo de Newton. Determinando um vetor de correção $\Delta \underline{x}$ procura-se resolver o sistema de equações $\underline{g}(\underline{x}^\nu) = \underline{0}$, sendo que a cada iteração deve-se resolver a equação (3.13).

$$\underline{g}(\underline{x}^\nu) = -\underline{J}(\underline{x}^\nu) \cdot \Delta \underline{x}^\nu \quad (3.13)$$

Relacionando as variáveis do FCNR com as da expressão (3.13), tem-se:

- $\underline{g}(\underline{x}^\nu)$, função vetorial que agrupa $\Delta \underline{P}^\nu$ e $\Delta \underline{Q}^\nu$ para a ν -ésima iteração:

$$\underline{g}(\underline{x}^\nu) = \begin{bmatrix} \Delta \underline{P}^\nu \\ \Delta \underline{Q}^\nu \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

sendo

$$\begin{aligned} \Delta \underline{P} &= \underline{P}^{esp} - \underline{P}(\underline{V}, \underline{\theta}) \\ \Delta \underline{Q} &= \underline{Q}^{esp} - \underline{Q}(\underline{V}, \underline{\theta}) \end{aligned} \quad (3.15)$$

- $\Delta \underline{x}^\nu$, vetor de correção associado às variáveis $\underline{V}$ e $\underline{\theta}$:

$$\Delta \underline{x}^\nu = \begin{bmatrix} \Delta \underline{\theta}^\nu \\ \Delta \underline{V}^\nu \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

- $\underline{J}(\underline{x}^\nu)$, matriz formada pelas derivadas parciais de (3.15) com relação a $\underline{V}$ e $\underline{\theta}$:

$$\underline{J}(\underline{x}^\nu) = \begin{bmatrix} \frac{\delta \Delta \underline{P}^\nu}{\delta \underline{\theta}^\nu} & \frac{\delta \Delta \underline{P}^\nu}{\delta \underline{V}^\nu} \\ \frac{\delta \Delta \underline{Q}^\nu}{\delta \underline{\theta}^\nu} & \frac{\delta \Delta \underline{Q}^\nu}{\delta \underline{V}^\nu} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Uma das barras do sistema deve ser tomada como referência para que $\underline{J}(\underline{x}^\nu)$ deixe de ser singular e possa ser invertida para a solução do FCNR.

Esta matriz, denominada matriz Jacobiana, pode ser simplificada, lembrando que nas equações (3.15) os valores das potências especificadas são constantes. Exemplificando:

$$\frac{\delta \Delta \underline{P}}{\delta \underline{\theta}} = \frac{\delta (\underline{P}^{esp} - \underline{P}(\underline{V}, \underline{\theta}))}{\delta \underline{\theta}} = \frac{\delta (-\underline{P}(\underline{V}, \underline{\theta}))}{\delta \underline{\theta}}$$

Dessa forma tem-se a seguinte matriz Jacobiana:

$$\underline{J}(\underline{x}^\nu) = - \begin{bmatrix} \frac{\delta \underline{P}^\nu}{\delta \underline{\theta}^\nu} & \frac{\delta \underline{P}^\nu}{\delta \underline{V}^\nu} \\ \frac{\delta \underline{Q}^\nu}{\delta \underline{\theta}^\nu} & \frac{\delta \underline{Q}^\nu}{\delta \underline{V}^\nu} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

subdividida em quatro submatrizes:

$$\mathbf{J}(\underline{x}^\nu) = - \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix}^\nu \quad (3.19)$$

onde

$$\begin{aligned} H_{kk} &= -Q_k - V_k^2 \cdot B_{kk} \\ H_{km} &= V_k \cdot V_m \cdot (G_{km} \cdot \text{sen}(\theta_{km}) - B_{km} \cdot \cos(\theta_{km})) \\ N_{kk} &= \frac{P_k}{V_k} + V_k \cdot G_{kk} \\ N_{km} &= V_k \cdot (G_{km} \cdot \cos(\theta_{km}) + B_{km} \cdot \text{sen}(\theta_{km})) \\ M_{kk} &= P_k - V_k^2 \cdot G_{kk} \\ M_{km} &= -V_k \cdot V_m \cdot (G_{km} \cdot \cos(\theta_{km}) + B_{km} \cdot \text{sen}(\theta_{km})) \\ L_{kk} &= \frac{Q_k}{V_k} - V_k \cdot B_{kk} \\ L_{km} &= V_k \cdot (G_{km} \cdot \text{sen}(\theta_{km}) - B_{km} \cdot \cos(\theta_{km})) \end{aligned}$$

sendo V_k e V_m as magnitudes das tensões nodais; P_k e Q_k as potências ativa e reativa calculadas através das equações (3.20); G_{km} e B_{km} as partes real e imaginária do elemento km da matriz admitância e θ_{km} a abertura angular entre as barras k e m .

$$\begin{aligned} P_k &= V_k \cdot \sum_{m \in K} V_m \cdot (G_{km} \cdot \cos \theta_{km} + B_{km} \cdot \text{sen} \theta_{km}) \\ Q_k &= V_k \cdot \sum_{m \in K} V_m \cdot (G_{km} \cdot \text{sen} \theta_{km} - B_{km} \cdot \cos \theta_{km}) \end{aligned} \quad (3.20)$$

onde K é o conjunto das barras vizinhas à barra k , incluindo a própria barra k .

Assim tem-se a formulação para o FCNR:

$$\begin{bmatrix} \Delta \underline{P}^\nu \\ \Delta \underline{Q}^\nu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix}^\nu \cdot \begin{bmatrix} \Delta \underline{\theta}^\nu \\ \Delta \underline{V}^\nu \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Pela resolução deste sistema de equações, obtém-se as correções o novo estado da rede elétrica. Assim, pode-se calcular os novos valores de potência para recalcular (3.15) e testar a convergência.

De maneira simplificada, pode-se estabelecer o seguinte algoritmo:

- i. escolher os valores iniciais das magnitudes das tensões (barras PQ) e fixar o valor do ângulo da barra $PV \rightarrow$ formar os vetores $\underline{V}^0$ e $\underline{\theta}^0$;
- ii. calcular $P_k(\underline{V}^\nu, \underline{\theta}^\nu)$ para as barras PQ e PV ; $Q_k(\underline{V}^\nu, \underline{\theta}^\nu)$ para as barras PQ e os desvios de potência ΔP_k^ν e ΔQ_k^ν , iniciando com $\nu = 0$;
- iii. testar a convergência: se $\max \{|\Delta P_k^\nu|\}_{k=PQ, PV} \leq \epsilon_P$ e $\max \{|\Delta Q_k^\nu|\}_{k=PQ} \leq \epsilon_Q$ o processo convergiu $\rightarrow$ ir para *viii*, se não, prosseguir;
- iv. calcular a matriz Jacobiana para os valores $(\underline{V}^\nu, \underline{\theta}^\nu)$;
- v. calcular as correções $\Delta \underline{\theta}^\nu$ e $\Delta \underline{V}^\nu$ e determinar a solução $(\underline{V}^{\nu+1}, \underline{\theta}^{\nu+1})$:

$$\begin{aligned}\underline{\theta}^{\nu+1} &= \underline{\theta}^\nu + \Delta \underline{\theta}^{\nu+1} \\ \underline{V}^{\nu+1} &= \underline{V}^\nu + \Delta \underline{V}^{\nu+1}\end{aligned}$$

- vi. incrementar ν ($\nu = \nu + 1$) e voltar ao passo (ii)
- vii. calcular P_k para a barra de referência e Q_K para as barras PV e de referência através das expressões (3.20).

Destaca-se que na primeira iteração, os desvios são calculados com os valores das condições iniciais do sistema ($\underline{V}^0$ e $\underline{\theta}^0$ ou para a condição de *Flat-Start*: magnitudes das tensões iguais a 1 p.u. e ângulos iguais a zero), ou seja, calculam-se as potências nas barras para estas condições e estas são subtraídas das potências especificadas nas mesmas barras, fornecendo os desvios para o teste de convergência. Nas iterações seguintes, enquanto não é satisfeito o critério de convergência, são utilizados os valores atualizados das magnitudes e dos ângulos das tensões.

Finalmente, é possível, com estes valores, calcular os valores dos fluxos nas ligações do sistema, equações (3.22), e das perdas na transmissão, equação (3.23).

$$\begin{aligned}P_{km} &= V_k^2 \cdot g_{km} - tap_{km} \cdot V_k \cdot V_m \cdot (g_{km} \cdot \cos(\theta_{km}) + b_{km} \cdot \sin(\theta_{km})) \\ P_{mk} &= V_m^2 \cdot g_{km} \cdot tap_{km}^2 - V_k \cdot V_m \cdot tap_{km} \cdot (g_{km} \cdot \cos(\theta_{km}) - b_{km} \cdot \sin(\theta_{km})) \\ Q_{km} &= -V_k^2 \cdot (b_{km} + b_{km}^{sh}) - tap_{km} \cdot V_k \cdot V_m \cdot (g_{km} \cdot \sin(\theta_{km}) - b_{km} \cdot \cos(\theta_{km})) \\ Q_{mk} &= -V_m^2 \cdot (b_{km} + b_{km}^{sh}) \cdot tap_{km}^2 + V_k \cdot V_m \cdot tap_{km} \cdot (g_{km} \cdot \sin(\theta_{km}) + b_{km} \cdot \cos(\theta_{km}))\end{aligned}\tag{3.22}$$

$$P_{km}^{Perdas} = g_{km} \cdot V_k^2 + g_{km} \cdot V_m^2 - 2 \cdot V_k \cdot V_m \cdot g_{km} \cdot \cos(\theta_{km})\tag{3.23}$$

3.7.2 Fluxo de Carga Newton Fuzzy Sinusoidal - FCNS

O FCNS foi desenvolvido em [8] visando obter uma distribuição de possibilidades para os resultados e utilizar os operadores nebulosos da função sinusoidal para o maior número de cálculos efetuados. Esta função de pertinência permitiu a simplificação dos cálculos na forma nebulosa, isso devido à utilização de operadores nebulosos.

Em princípio tentou-se elaborar uma rotina que fosse capaz de calcular todo o FCNS utilizando os números na forma nebulosa, ou seja, sem a necessidade de transformações, de nebulosos para determinístico e ao final vice-versa. Para isto desenvolveu-se uma metodologia de FCNS que utiliza operadores nebulosos para realizar os cálculos, denominada Fluxo de Carga Sinusoidal Nebuloso (FCSN).

No entanto, esta técnica não proporcionou bons resultados, pois os desvios obtidos eram absurdos, causados pela grande quantidade de multiplicações presentes durante o processo de convergência.

Foi necessário recorrer ao artifício em que se calcula um FCNR com os valores médios das distribuições de possibilidades, que para a função sinusoidal correspondem aos valores de m das distribuições de possibilidades.

Assim, uma parte do FCSN tem que ser simulada utilizando o FCNR, sendo que este é simulado somente para o cálculo das magnitudes das tensões e dos ângulos. Estes valores de V e θ são considerados os valores de m para estas variáveis, restando o cálculo dos desvios para estas. O cálculo destes desvios utiliza a matriz Jacobiana da última iteração e os desvios das injeções líquidas de potência nas barras. As demais variáveis para a análise completa da rede, são calculadas diretamente na forma nebulosa.

Foi proposta também uma maneira discreta de efetuar os cálculos. Esta metodologia teve como principal objetivo minimizar os erros para as linhas com baixos fluxos e é chamada de Fluxo de Carga Sinusoidal Discreto (FCSD).

A seguir são descritas as duas metodologias para o FCNS.

3.7.3 Fluxo de Carga Sinusoidal Nebuloso - FCSN

O primeiro passo para obter as distribuições de possibilidades para os resultados é simular um FCNR com os valores centrais das distribuições dos dados fornecidos para o sistema, ou seja, utilizam-se apenas os valores de m relativos aos dados de potência ativa e reativa injetadas (figura 3.2). A partir desta simulação, obtém-se os valores $\underline{V}_m$ e $\underline{\theta}_m$.

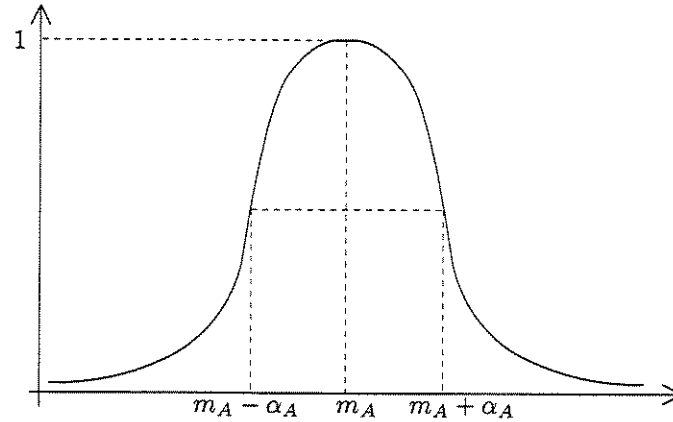


Figura 3.2: Função Sinusoidal

Os valores $\underline{V}_m$ e $\underline{\theta}_m$ são considerados agora os valores de maior grau de pertinência para formar as distribuições de possibilidades para estas variáveis, ou seja, são os respectivos valores de m . Resta agora o cálculo dos desvios (α) destas variáveis.

Os desvios para $\underline{V}_m$ e $\underline{\theta}_m$ são obtidos multiplicando-se a matriz Jacobiana obtida na última iteração pelos valores dos desvios das injeções líquidas das potências de entrada ($\alpha_{P_{liq}}$ e $\alpha_{Q_{liq}}$).

Os desvios líquidos para as injeções de potência ativa ($\alpha_{P_k}^{liq}$) e reativa ($\alpha_{Q_k}^{liq}$) são obtidos a partir dos desvios fornecidos para as potências ativa (α_{P_k}) e reativa (α_{Q_k}) nas barras, tendo como referência o banco de dados. Para os cálculos dos desvios líquidos de potência, toma-se o menor desvio entre os desvios para as potências geradas ($\alpha_{P_k}^{ger}$ e $\alpha_{Q_k}^{ger}$) e para as potências consumidas ($\alpha_{P_k}^{carga}$ e $\alpha_{Q_k}^{carga}$).

Como exemplo, suponha que uma barra PV possui potência reativa gerada (e consequentemente $\alpha_{Q_k}^{ger}$) e potência reativa consumida ($\alpha_{Q_k}^{carga}$). Então o desvio líquido será o menor destes dois valores.

Caso uma barra não possua potência gerada, o desvio líquido é o próprio desvio da potência consumida, e vice-versa, como expresso em (3.24).

$$\begin{aligned} \alpha_{P_k}^{liq} &= \min(\alpha_{P_k}^{ger}, \alpha_{P_k}^{carga}) & \alpha_{P_k}^{liq} &\neq 0 \\ \alpha_{Q_k}^{liq} &= \min(\alpha_{Q_k}^{ger}, \alpha_{Q_k}^{carga}) & \alpha_{Q_k}^{liq} &\neq 0 \end{aligned} \quad (3.24)$$

onde

- $\alpha_{P_k}^{liq}$ e $\alpha_{Q_k}^{liq}$ - são respectivamente os desvios líquidos das potências ativa e reativa na barra k

- $\alpha_{P_k}^{ger}$ e $\alpha_{Q_k}^{ger}$ - são respectivamente os desvios das potências ativa e reativa geradas na barra k
- $\alpha_{P_k}^{carga}$ e $\alpha_{Q_k}^{carga}$ - são respectivamente os desvios das potências ativa e reativa consumidas na barra k

O desvio em uma barra é nulo se sua injeção líquida de potência é nula ou se a partir do banco de dados têm-se desvio nulo para as potências desta barra.

A multiplicação entre os desvios líquidos e a matriz Jacobiana obtida na última iteração, é baseada no princípio de que caso se tome a variação global de $\Delta \underline{P}$ e $\Delta \underline{Q}$, desde a primeira à última iteração do FCNR e multiplique-se esta variação pela Jacobiana, tem-se os desvios globais para $\underline{V}$ e $\underline{\theta}$.

Considerando que os desvios para $\underline{V}$ e $\underline{\theta}$ são inicialmente nulos, os valores para $\underline{\alpha}_{Pliqcalc}$ e $\underline{\alpha}_{Qliqcalc}$ calculados na primeira iteração serão nulos. Caso fosse possível executar o processo iterativo totalmente na forma nebulosa, estes desvios iriam de zero aos valores de $\underline{\alpha}_{Pliq}$ e $\underline{\alpha}_{Qliq}$.

Toma-se então os valores de $\underline{\alpha}_{Pliq}$ e $\underline{\alpha}_{Qliq}$ para calcular os desvios globais para $\tilde{\underline{V}}$ e $\tilde{\underline{\theta}}$, obtendo então as variáveis na forma nebulosa.

$$\underline{\alpha}_{(\theta,V)} = [J_{final}]^{-1} \cdot \underline{\alpha}_{liqPQ} \quad (3.25)$$

onde

$[J_{final}]$ - matriz construída na última iteração do Fluxo de Carga Newton - Raphson

$\underline{\alpha}_{(\theta,V)}$ - vetor dos desvios dos ângulos e magnitudes das tensões nas barras

$\underline{\alpha}_{liqPQ}$ - vetor formado pelos desvios líquidos das potências ativa e reativa das barras

Obtidos os valores dos ângulos e das magnitudes das tensões nas barras na forma nebulosa, pode-se calcular os fluxos nos ramos, as perdas e as potências reativas geradas nas barras de referência e PV bem como a potência ativa gerada na barra de referência. Neste ponto teve-se que utilizar dois tipos de função de multiplicação (faixa larga e faixa estreita), devido à diferente quantidade de multiplicações presentes nas expressões utilizadas nos cálculos das variáveis.

Para o cálculo dos fluxos de potência na linhas de transmissão utiliza-se a função de faixa estreita, para restringir o valor de α que tende a aumentar devido à grande quantidade de multiplicações nestas expressões. Para os fluxos nos transformadores, perdas na transmissão e potências geradas utiliza-se a função de faixa larga.

O cálculo dos fluxos de potência nos ramos é executado utilizando-se as mesmas estruturas das expressões do FCNR, onde se utiliza $\tilde{\underline{V}}$ e $\tilde{\underline{\theta}}$ na forma nebulosa. As operações são

executadas utilizando os operadores nebulosos desenvolvidos para a função sinusoidal, como indicado nas equações (3.26).

$$\begin{aligned}
\tilde{P}_{km} &= \tilde{V}_k^2 \otimes g_{km} \ominus tap_{km} \otimes \tilde{V}_k \otimes \tilde{V}_m \otimes (g_{km} \otimes \cos(\tilde{\theta}_{km}) \oplus b_{km} \otimes \sin(\tilde{\theta}_{km})) \\
\tilde{P}_{mk} &= \tilde{V}_m^2 \otimes g_{km} \otimes tap_{km}^2 \ominus \tilde{V}_k \otimes \tilde{V}_m \otimes tap_{km} \otimes (g_{km} \otimes \cos(\tilde{\theta}_{km}) \ominus b_{km} \otimes \sin(\tilde{\theta}_{km})) \\
\tilde{Q}_{km} &= \tilde{V}_k^2 \otimes (b_{km} \oplus b_{km}^{sh}) \ominus tap_{km} \otimes \tilde{V}_k \otimes \tilde{V}_m \otimes (g_{km} \otimes \sin(\tilde{\theta}_{km}) \ominus b_{km} \otimes \cos(\tilde{\theta}_{km})) \\
\tilde{Q}_{mk} &= \tilde{V}_m^2 \otimes (b_{km} \oplus b_{km}^{sh}) \otimes tap_{km}^2 \oplus \tilde{V}_k \otimes \tilde{V}_m \otimes tap_{km} \otimes (g_{km} \otimes \sin(\tilde{\theta}_{km}) \oplus b_{km} \otimes \cos(\tilde{\theta}_{km}))
\end{aligned} \tag{3.26}$$

sendo

$\tilde{V}$ - magnitude da tensão na forma de um número nebuloso (m_v, α_v) ;

$\otimes$ - multiplicação *fuzzy*, faixa estreita, com exceção dos transformadores;

$\oplus$ e $\ominus$ - subtração e soma nebulosas.

Para os cálculos da potência ativa gerada na barra de referência e das potências reativas geradas nas barras PV e de referência tem-se as seguintes expressões:

$$\begin{aligned}
\tilde{P}_k &= \tilde{V}_k \otimes \sum_{m \in K} \tilde{V}_m \otimes (G_{km} \otimes \cos \tilde{\theta}_{km} \oplus B_{km} \otimes \sin \tilde{\theta}_{km}) \\
\tilde{Q}_k &= \tilde{V}_k \otimes \sum_{m \in K} \tilde{V}_m \otimes (G_{km} \otimes \sin \tilde{\theta}_{km} \ominus B_{km} \otimes \cos \tilde{\theta}_{km})
\end{aligned} \tag{3.27}$$

E para as perdas:

$$\tilde{P}_{Perdaskm} = g_{km} \otimes \tilde{V}_k^2 + g_{km} \otimes \tilde{V}_m^2 \otimes tap_{km}^2 - 2 \otimes tap_{km}^2 \otimes \tilde{V}_k \otimes \tilde{V}_m \otimes g_{km} \otimes \cos(\tilde{\theta}_{km}) \tag{3.28}$$

sendo

$\otimes$ - multiplicação *fuzzy* faixa larga.

3.7.4 Fluxo de Carga Sinusoidal Discreto - FCSD

No intuito de minimizar os erros para os ramos com baixos fluxos, foi também proposta em [8] uma maneira “discreta” de se calcular os fluxos nestes ramos, as perdas na transmissão

e as potências nas barras. Esta maneira é idêntica à anterior até o momento do cálculo dos desvios das magnitudes das tensões e dos ângulos. A partir destes cálculos procede-se da maneira descrita a seguir.

Para esta metodologia deve-se calcular todas as variáveis (magnitudes e ângulos de tensões, fluxos de potência, potências geradas e perdas) do fluxo de carga com o FCNR e não somente as magnitudes e os ângulos das tensões, como feito na metodologia anterior.

A partir do momento em que se tem as distribuições de $\tilde{V}$ e $\tilde{\theta}$ prontas, calculam-se os valores máximo e mínimo para estas variáveis de acordo com uma rotina de ordenação, para obter uma distribuição como a da figura (3.1).

A maneira adotada para obter este indicador foi a de tomar os valores máximos de potência ativa e reativa nas barras e subtrair destes valores os valores finais das potências obtidas ao final do fluxo convergido (valores de m para as potências na última iteração), tanto para potência ativa como para a reativa, equação (3.30).

$$\begin{aligned}\Delta P &= (P_{espec}^{ger} + \alpha_{P_{espec}^{ger}}) - (P_{espec}^{carga} + \alpha_{P_{espec}^{carga}}) - P_{calc}^{atual} \\ \Delta Q &= (Q_{espec}^{ger} + \alpha_{Q_{espec}^{ger}}) - (Q_{espec}^{carga} + \alpha_{Q_{espec}^{carga}}) - Q_{calc}^{atual}\end{aligned}\quad (3.29)$$

Utilizando este procedimento para todas as barras, forma-se um vetor de desvios composto por $\Delta \underline{P}$ e $\Delta \underline{Q}$. Multiplicando a matriz Jacobiana da última iteração com o vetor anteriormente formado, obtém-se os indicadores:

$$\begin{bmatrix} \alpha_{\theta sinal} \\ \alpha_{v sinal} \end{bmatrix} = [J]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \underline{P} \\ \Delta \underline{Q} \end{bmatrix}\quad (3.30)$$

Caso o indicador para a magnitude da tensão seja positivo faz-se:

$$\begin{aligned}V_{min} &= (V_{mk} - \alpha_{v_k}) \\ V_{max} &= (V_{mk} + \alpha_{v_k})\end{aligned}\quad (3.31)$$

- caso contrário:

$$\begin{aligned}V_{min} &= (V_{mk} + \alpha_{v_k}) \\ V_{max} &= (V_{mk} - \alpha_{v_k})\end{aligned}\quad (3.32)$$

E para o ângulo, se este for positivo:

- e o indicador negativo:

$$\begin{aligned}\theta_{min} &= (\theta_{mk} + \alpha_{\theta_k}) \\ \theta_{max} &= (\theta_{mk} - \alpha_{\theta_k})\end{aligned}\tag{3.33}$$

- e o indicador positivo:

$$\begin{aligned}\theta_{min} &= (\theta_{mk} - \alpha_{\theta_k}) \\ \theta_{max} &= (\theta_{mk} + \alpha_{\theta_k})\end{aligned}\tag{3.34}$$

Se o ângulo for negativo:

- e o indicador negativo:

$$\begin{aligned}\theta_{min} &= (\theta_{mk} - \alpha_{\theta_k}) \\ \theta_{max} &= (\theta_{mk} + \alpha_{\theta_k})\end{aligned}\tag{3.35}$$

- e o indicador positivo:

$$\begin{aligned}\theta_{min} &= (\theta_{mk} + \alpha_{\theta_k}) \\ \theta_{max} &= (\theta_{mk} - \alpha_{\theta_k})\end{aligned}\tag{3.36}$$

Após determinar-se os valores máximos e mínimos para estas variáveis, resta somente calcular os valores também máximos e mínimos para as demais variáveis do fluxo de carga.

Para efetuar estes cálculos são utilizadas as expressões do FCNR diretamente, conforme (3.37), onde está sendo calculada a potência ativa gerada máxima nas barras PV e de referência.

$$P_k^{max} = V_k^{max} \cdot \sum_{m \in K} V_m^{max} \cdot (G_{km} \cdot \cos(\theta_{km}^{max}) + B_{km} \cdot \sen(\theta_{km}^{max}))\tag{3.37}$$

O mesmo procedimento é repetido para os pontos de mínimas magnitudes das tensões e ângulos e para o restante das variáveis. Ao final tem-se três valores para cada variável, ou seja, os valores de máximo e mínimo para cada variável e o valor médio da variável calculado a partir do FCNR simulado previamente.

Para obter os valores dos desvios (α) das variáveis, executa-se uma média aritmética, como na equação (3.38), novamente utilizando a potência ativa gerada nas barras PVs e de referência.

$$\alpha_{P_k} = \frac{(|P_k^{max} - P_k^{medio}| + |P_k^{min} - P_k^{medio}|)}{2} \quad (3.38)$$

Repetindo-se a expressão (3.38) para todas as variáveis obtém-se os valores de α para todas elas. Consequentemente formam-se as distribuições de possibilidades.

Neste capítulo foi apresentada uma visão geral sobre as teorias de Conjuntos Nebulosos e foram descritos procedimentos de cálculo de Fluxo de Carga, que nos possibilitaram executar o próximo passo que é a tradução dos resultados numéricos em lingüísticos.

Capítulo 4

Tradução de Resultados Numéricos em Lingüísticos

Com o desenvolvimento da Teoria de Conjuntos Nebulosos e da Teoria de Possibilidades, tornou-se possível introduzir na metodologia de fluxo de carga as imprecisões presentes nos sistemas de potência e também afirmações do tipo “o fluxo de potência em um determinado ramo está alto”, que não sendo nem determinísticas e nem probabilísticas, em geral não têm a mesma interpretação por diferentes pessoas.

A partir das distribuições de possibilidades dos dados de saída na forma sinusoidal, é possível estabelecer uma forma melhor de interpretar as afirmações como por exemplo, “a tensão em determinada barra está boa”. A figura 4.1 ilustra a faixa de variação para o grau de pertinência, possibilitando estabelecer padrões para análise.

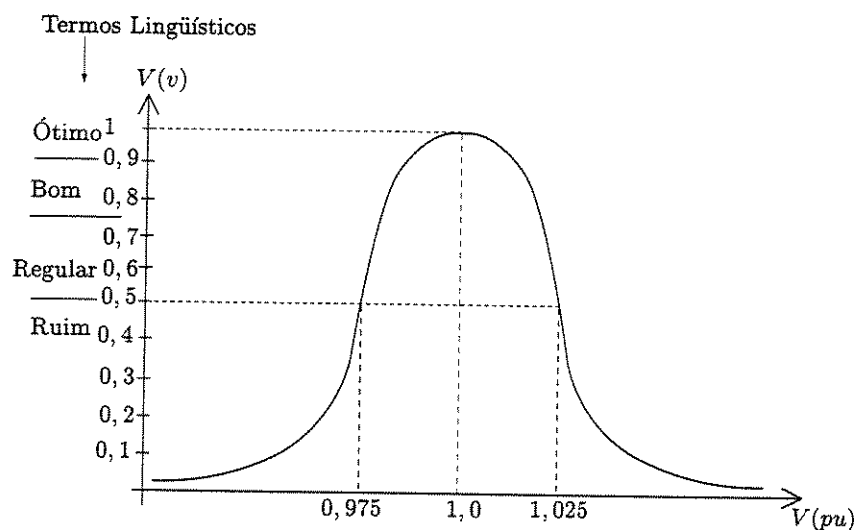


Figura 4.1: Termos Lingüísticos

Assim, este tipo de afirmação que antes tinha diferentes interpretações, agora pode ser interpretada de uma forma mais coerente e confiável, o que traz benefícios para a área de operação dos sistemas de energia elétrica.

As afirmações utilizam termos qualificativos do tipo “bom/ruim”, que determinam uma faixa de variação para o grau de pertinência.

Para qualificar as variáveis analisadas, como por exemplo tensão e fluxo de potência ativa, estabeleceu-se a seguinte classificação:

Tabela 4.1: Termos qualificativos para faixas de variações do grau de pertinência

Intervalo de grau de pertinência	[0,90 1,0]	[0,75 0,90]	[0,50 0,75]	[0,30 0,50]
Qualificativo	ÓTIMO	BOM	REGULAR	RUIM

Assim, consegue-se estabelecer um padrão de análise, como por exemplo, sempre que o grau de pertinência estiver entre [0,75 0,90] pode-se dizer que a variável analisada está boa, e este procedimento pode ser efetuado para todas as variáveis do sistema.

Critério de Escolha das Faixas de Variações para o Grau de Pertinência

As faixas de variações do grau de pertinência foram feitas considerando sua variação percentual. Exemplificando, para uma variação do grau de pertinência de até 90% pode-se considerar o qualificativo *ótimo* (considerando que pertinência igual a 1 equivale a 100%), até 75% *bom*, até 50% para *regular* e 30% para *ruim*, a figura 4.2 ilustra o exemplo.

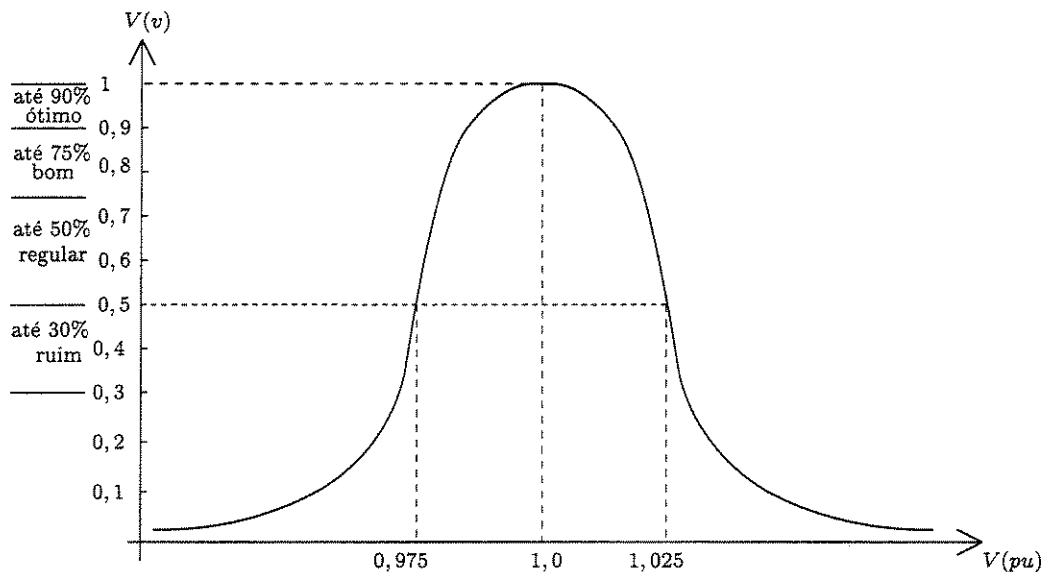


Figura 4.2: Faixa de Variação

Os qualificativos para as faixas de variações foram os mesmos determinados anteriormente. Não houve muita preocupação em relação aos limites das faixas de variações, sendo estas flexíveis de acordo com a variável em análise, porém, neste trabalho, independentemente da variável analisada, utilizou-se as mesmas faixas de variações. Foi necessário estabelecer uma interpolação entre o valor da variação simulada (valor medido) da variável em análise e a função de pertinência, determinando qual é o novo grau de pertinência para a variável, e finalmente pode-se determinar em qual faixa de variação este novo grau pertencerá, e como a faixa de variação está vinculada a um termo lingüístico, pôde-se trocar o resultado numérico pelo resultado lingüístico.

4.1 Aplicação da Metodologia

4.1.1 Elaboração do Programa Computacional

Foi desenvolvido um programa computacional baseado em Newton-Raphson para executar o Fluxo de Carga Newton-Raphson (FCNR).

A seguir, este programa sofreu algumas modificações, visando inserir as imprecisões presentes no sistema elétrico, com base na formulação apresentada em [8] que fundamenta o Fluxo de Carga Newton Fuzzy Sinusoidal (FCNS), sendo que este método utiliza a função de pertinência sinusoidal para efetuar os cálculos na forma nebulosa.

Para o desenvolvimento do programa foi utilizado o *software* MATLAB®(versão 6.0), devido este apresentar parte das funções necessárias para o desenvolvimento do projeto, além de ser uma ferramenta com muitos recursos, de modo a tornar práticas as rotinas do programa computacional.

4.1.2 Apresentação dos Algoritmos Computacionais

4.1.2.1 FCNR

SUBSISTEMA 1

- i. Fazer $v = 0$ (contador de iterações)
Escolher valores iniciais das magnitudes (barras PQ) e ângulos de fase (barras PQ e PV)
Assumir magnitudes das tensões iguais a 1 p.u. (PQ) e ângulos de fase iguais a zero (PQ e PV)
Formar os vetores (V° e θ°)

- ii. Calcular $P_k(V^v, \theta^v)$ para as barras PQ e PV
 Calcular $Q_k(V^v, \theta^v)$ para as barras PQ
 Calcular os desvios de potências ΔP_k^v e ΔQ_k^v
- iii. Testar convergência
 Se $\max |\Delta P_k^v| \leq \varepsilon_P$ e $\max |\Delta Q_k^v| \leq \varepsilon_Q$, o processo iterativo convergiu para a solução (V^v, θ^v) ; ir para o passo vii.
 Caso contrário, prosseguir.
- iv. Calcular Matriz Jacobiana

$$J(\underline{V}^v, \underline{\theta}^v) = \begin{bmatrix} H(\underline{V}^v, \underline{\theta}^v) & N(\underline{V}^v, \underline{\theta}^v) \\ M(\underline{V}^v, \underline{\theta}^v) & L(\underline{V}^v, \underline{\theta}^v) \end{bmatrix}$$

- v. Calcular as correções $\Delta \underline{\theta}^v$ e $\Delta \underline{V}^v$ resolvendo o sistema linear

$$\begin{bmatrix} \Delta \underline{P}(\underline{V}^v, \underline{\theta}^v) \\ \Delta \underline{Q}(\underline{V}^v, \underline{\theta}^v) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H(\underline{V}^v, \underline{\theta}^v) & N(\underline{V}^v, \underline{\theta}^v) \\ M(\underline{V}^v, \underline{\theta}^v) & L(\underline{V}^v, \underline{\theta}^v) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \underline{\theta}^v \\ \Delta \underline{V}^v \end{bmatrix}$$

e determinar a nova solução $(\underline{V}^{v+1}, \underline{\theta}^{v+1})$

$$\begin{aligned} \underline{\theta}^{v+1} &= \underline{\theta}^v + \Delta \underline{\theta}^v \\ \underline{V}^{v+1} &= \underline{V}^v + \Delta \underline{V}^v \end{aligned}$$

- vi. Incrementar o contador de iterações ($v \leftarrow v + 1$) e retornar ao passo ii.

Resolvido o SUBSISTEMA 1 tem-se o estado $(\underline{V}, \underline{\theta})$ para toda a rede e pode-se resolver o SUBSISTEMA 2.

SUBSISTEMA 2

- vii. Calcular P_k para a barra de referência e Q_k para as barras PV e de referência.

$$\begin{aligned} P_k &= V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \cdot \cos \theta_{km} + B_{km} \cdot \sen \theta_{km}) \\ Q_k &= V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \cdot \sen \theta_{km} - B_{km} \cdot \cos \theta_{km}) \end{aligned}$$

viii. Calcular os fluxos de potência P_{km} e Q_{km} (P_{mk} e Q_{mk}) nos ramos.

$$\begin{aligned} P_{km} &= V_k^2 \cdot g_{km} - tap_{km} \cdot V_k \cdot V_m \cdot (g_{km} \cdot \cos(\theta_{km}) + b_{km} \cdot \sin(\theta_{km})) \\ P_{mk} &= V_m^2 \cdot g_{km} \cdot tap_{km}^2 - V_k \cdot V_m \cdot tap_{km} \cdot (g_{km} \cdot \cos(\theta_{km}) - b_{km} \cdot \sin(\theta_{km})) \\ Q_{km} &= -V_k^2 \cdot (b_{km} + b_{km}^{sh}) - tap_{km} \cdot V_k \cdot V_m \cdot (g_{km} \cdot \sin(\theta_{km}) - b_{km} \cdot \cos(\theta_{km})) \\ Q_{mk} &= -V_m^2 \cdot (b_{km} + b_{km}^{sh}) \cdot tap_{km}^2 + V_k \cdot V_m \cdot tap_{km} \cdot (g_{km} \cdot \sin(\theta_{km}) + b_{km} \cdot \cos(\theta_{km})) \end{aligned}$$

ix. Calcular as perdas de potência ativa na transmissão.

$$P_{km}^{Perdas} = g_{km} \cdot V_k^2 + g_{km} \cdot V_m^2 - 2 \cdot V_k \cdot V_m \cdot g_{km} \cdot \cos(\theta_{km})$$

4.1.2.2 FCSN

SUBSISTEMA 1

Proceder do mesmo modo como no FCNR até o passo *vi*.

vii. Calcular os desvios de potências ativa ($\alpha_{P_{ger}}$ e $\alpha_{P_{carga}}$) e reativa ($\alpha_{Q_{ger}}$ e $\alpha_{Q_{carga}}$), e determinar os desvios líquidos destas potências ($\alpha_{P_k^{liq}}$ e $\alpha_{Q_k^{liq}}$)

$$\alpha_{P_k^{liq}} = \min(\alpha_{P_k^{ger}}, \alpha_{P_k^{carga}}) \quad \alpha_{P_k^{liq}} \neq 0$$

$$\alpha_{Q_k^{liq}} = \min(\alpha_{Q_k^{ger}}, \alpha_{Q_k^{carga}}) \quad \alpha_{Q_k^{liq}} \neq 0$$

viii. Calcular os desvios globais para as magnitudes e os ângulos de fase (α_V e α_θ) das tensões nodais

$$\alpha_{(\theta, V)} = [J_{final}]^{-1} \cdot \alpha_{PQ}^{liq}$$

SUBSISTEMA 2

- ix. Calcular $\tilde{P}_k$ para a barra de referência e $\tilde{Q}_k$ para as barras PV e de referência.

$$\tilde{P}_k = \tilde{V}_k \otimes \sum_{m \in K} \tilde{V}_m \otimes (G_{km} \otimes \cos(\tilde{\theta}_{km}) \oplus B_{km} \otimes \sin(\tilde{\theta}_{km}))$$

$$\tilde{Q}_k = \tilde{V}_k \otimes \sum_{m \in K} \tilde{V}_m \otimes (G_{km} \otimes \sin(\tilde{\theta}_{km}) \ominus B_{km} \otimes \cos(\tilde{\theta}_{km}))$$

- x. Calcular os fluxos de potência $\tilde{P}_{km}$ e $\tilde{Q}_{km}$ ($\tilde{P}_{mk}$ e $\tilde{Q}_{mk}$) nos ramos.

$$\tilde{P}_{km} = \tilde{V}_k^2 \otimes g_{km} \ominus tap_{km} \otimes \tilde{V}_k \otimes \tilde{V}_m \otimes (g_{km} \otimes \cos(\tilde{\theta}_{km}) \oplus b_{km} \otimes \sin(\tilde{\theta}_{km}))$$

$$\tilde{P}_{mk} = \tilde{V}_m^2 \otimes g_{km} \otimes tap_{km}^2 \ominus \tilde{V}_k \otimes \tilde{V}_m \otimes tap_{km} \otimes (g_{km} \otimes \cos(\tilde{\theta}_{km}) \oplus b_{km} \otimes \sin(\tilde{\theta}_{km}))$$

$$\tilde{Q}_{km} = \tilde{V}_k^2 \otimes (b_{km} \oplus b_{km}^{sh}) \ominus tap_{km} \otimes \tilde{V}_k \otimes \tilde{V}_m \otimes (g_{km} \otimes \sin(\tilde{\theta}_{km}) \ominus b_{km} \otimes \cos(\tilde{\theta}_{km}))$$

$$\tilde{Q}_{mk} = \tilde{V}_m^2 \otimes (b_{km} \oplus b_{km}^{sh}) \otimes tap_{km}^2 \oplus \tilde{V}_k \otimes \tilde{V}_m \otimes tap_{km} \otimes (g_{km} \otimes \sin(\tilde{\theta}_{km}) \oplus b_{km} \otimes \cos(\tilde{\theta}_{km}))$$

- xi. Calcular as perdas de potência ativa na transmissão.

$$\tilde{P}_{km}^{Perdas} = g_{km} \otimes \tilde{V}_k^2 + g_{km} \otimes \tilde{V}_m^2 \otimes tap_{km}^2 - 2 \otimes tap_{km}^2 \otimes \tilde{V}_k \otimes \tilde{V}_m \otimes g_{km} \otimes \cos(\tilde{\theta}_{km})$$

4.1.2.3 FCSD**SUBSISTEMA 1**

Proceder do mesmo modo como no FCSN com operadores nebulosos.

SUBSISTEMA 2

- ix. Calcular P_k para a barra de referência e Q_k para as barras PV e de referência.

$$P_k = V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \cdot \cos \theta_{km} + B_{km} \cdot \sen \theta_{km})$$

$$Q_k = V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \cdot \sen \theta_{km} - B_{km} \cdot \cos \theta_{km})$$

- x. Calcular os fluxos de potência P_{km} e Q_{km} (P_{mk} e Q_{mk}) nos ramos.

$$\begin{aligned} P_{km} &= V_k^2 \cdot g_{km} - tap_{km} \cdot V_k \cdot V_m \cdot (g_{km} \cdot \cos(\theta_{km}) + b_{km} \cdot \sen(\theta_{km})) \\ P_{mk} &= V_m^2 \cdot g_{km} \cdot tap_{km}^2 - V_k \cdot V_m \cdot tap_{km} \cdot (g_{km} \cdot \cos(\theta_{km}) - b_{km} \cdot \sen(\theta_{km})) \\ Q_{km} &= -V_k^2 \cdot (b_{km} + b_{km}^{sh}) - tap_{km} \cdot V_k \cdot V_m \cdot (g_{km} \cdot \sen(\theta_{km}) - b_{km} \cdot \cos(\theta_{km})) \\ Q_{mk} &= -V_m^2 \cdot (b_{km} + b_{km}^{sh}) \cdot tap_{km}^2 + V_k \cdot V_m \cdot tap_{km} \cdot (g_{km} \cdot \sen(\theta_{km}) + b_{km} \cdot \cos(\theta_{km})) \end{aligned}$$

- xi. Calcular as perdas de potência ativa na transmissão.

$$P_{km}^{Perdas} = g_{km} \cdot V_k^2 + g_{km} \cdot V_m^2 - 2 \cdot V_k \cdot V_m \cdot g_{km} \cdot \cos(\theta_{km})$$

- xii. Calcular os desvios em P_k para a barra de referência e em Q_k para as barras PV e de referência.

NOTA: É necessária a determinação de valores máximos e mínimos para a magnitude e ângulo de fase das tensões nodais. Determina-se assim, P_k^{max} e P_k^{min} , Q_k^{max} e Q_k^{min} e finalmente αP e αQ .

$$P_k^{max} = V_k^{max} \sum_{m \in K} V_m^{max} (G_{km} \cdot \cos \theta_{km}^{max} + B_{km} \cdot \sen \theta_{km}^{max})$$

$$P_k^{min} = V_k^{min} \sum_{m \in K} V_m^{min} (G_{km} \cdot \cos \theta_{km}^{min} + B_{km} \cdot \sen \theta_{km}^{min})$$

$$Q_k^{max} = V_k^{max} \sum_{m \in K} V_m^{max} (G_{km} \cdot \sen \theta_{km}^{max} - B_{km} \cdot \cos \theta_{km}^{max})$$

$$Q_k^{min} = V_k^{min} \sum_{m \in K} V_m^{min} (G_{km} \cdot \text{sen } \theta_{km}^{min} - B_{km} \cdot \cos \theta_{km}^{min})$$

$$\alpha P_k = (| (P_k^{max} - P_k) |) + (| (P_k^{min} - P_k) |) / 2$$

$$\alpha Q_k = (| (Q_k^{max} - Q_k) |) + (| (Q_k^{min} - Q_k) |) / 2$$

- xiii. Calcular os desvios dos fluxos de potência αP_{km} e αQ_{km} (αP_{mk} e αQ_{mk}) nos ramos. Determinar P_{km}^{max} e P_{km}^{min} , Q_{km}^{max} e Q_{km}^{min}

$$P_{km}^{max} = V_{k^{max}}^2 \cdot g_{km} - \text{tap}_{km} \cdot V_k^{max} \cdot V_m^{max} \cdot (g_{km} \cdot \cos(\theta_{km}^{max}) + b_{km} \cdot \text{sen}(\theta_{km}^{max}))$$

$$P_{km}^{min} = V_{k^{min}}^2 \cdot g_{km} - \text{tap}_{km} \cdot V_k^{min} \cdot V_m^{min} \cdot (g_{km} \cdot \cos(\theta_{km}^{min}) + b_{km} \cdot \text{sen}(\theta_{km}^{min}))$$

$$Q_{km}^{max} = -V_{k^{max}}^2 \cdot (b_{km} + b_{km}^{sh}) - \text{tap}_{km} \cdot V_k \cdot V_m^{max} \cdot (g_{km} \cdot \text{sen}(\theta_{km}^{max}) - b_{km} \cdot \cos(\theta_{km}^{max}))$$

$$Q_{km}^{min} = -V_{k^{min}}^2 \cdot (b_{km} + b_{km}^{sh}) - \text{tap}_{km} \cdot V_k \cdot V_m^{min} \cdot (g_{km} \cdot \text{sen}(\theta_{km}^{min}) - b_{km} \cdot \cos(\theta_{km}^{min}))$$

$$\alpha P_{km} = (| (P_{km}^{max} - P_{km}) |) + (| (P_{km}^{min} - P_{km}) |) / 2$$

$$\alpha Q_{km} = (| (Q_{km}^{max} - Q_{km}) |) + (| (Q_{km}^{min} - Q_{km}) |) / 2$$

- ix. Calcular os desvios para as perdas de potência ativa na transmissão.

Determinar P_{perdas}^{max} e P_{perdas}^{min}

$$P_{perdas}^{max} = g_{km} \cdot V_{k^{max}}^2 + g_{km} \cdot V_{m^{max}}^2 - 2 \cdot V_k^{max} \cdot V_m^{max} \cdot g_{km} \cdot \cos(\theta_{km}^{max})$$

$$P_{perdas}^{min} = g_{km} \cdot V_{k^{min}}^2 + g_{km} \cdot V_{m^{min}}^2 - 2 \cdot V_k^{min} \cdot V_m^{min} \cdot g_{km} \cdot \cos(\theta_{km}^{min})$$

$$\alpha P_{perdas} = (| (P_{perdas}^{max} - P_{perdas}) |) + (| (P_{perdas}^{min} - P_{perdas}) |) / 2$$

4.1.3 Implementação dos Algoritmos Computacionais

Após ter-se um algoritmo computacional para cálculo do Fluxo de Carga Newton-Raphson levando em consideração operações matemáticas na forma nebulosa vinculadas à função de pertinência sinusoidal (FCNS), foi desenvolvido um algoritmo computacional que teve como objetivo fazer com que os resultados obtidos no FCNS fossem transformados em resultados lingüísticos.

Os principais passos desta implementação computacional são apresentados no fluxograma da figura 4.3. Este passo foi adicionado nas duas versões de Fluxo de Carga Newton Fuzzy Sinusoidal (FCSN e FCSD).

Após plotar a função sinusoidal incorporando o valor medido, faz-se uma interpolação deste valor com a função plotada, sendo o resultado da interpolação o grau de pertinência para o valor medido. A seguir determina-se em qual faixa de variação do grau de pertinência pertence este resultado interpolado e consequentemente o valor medido.

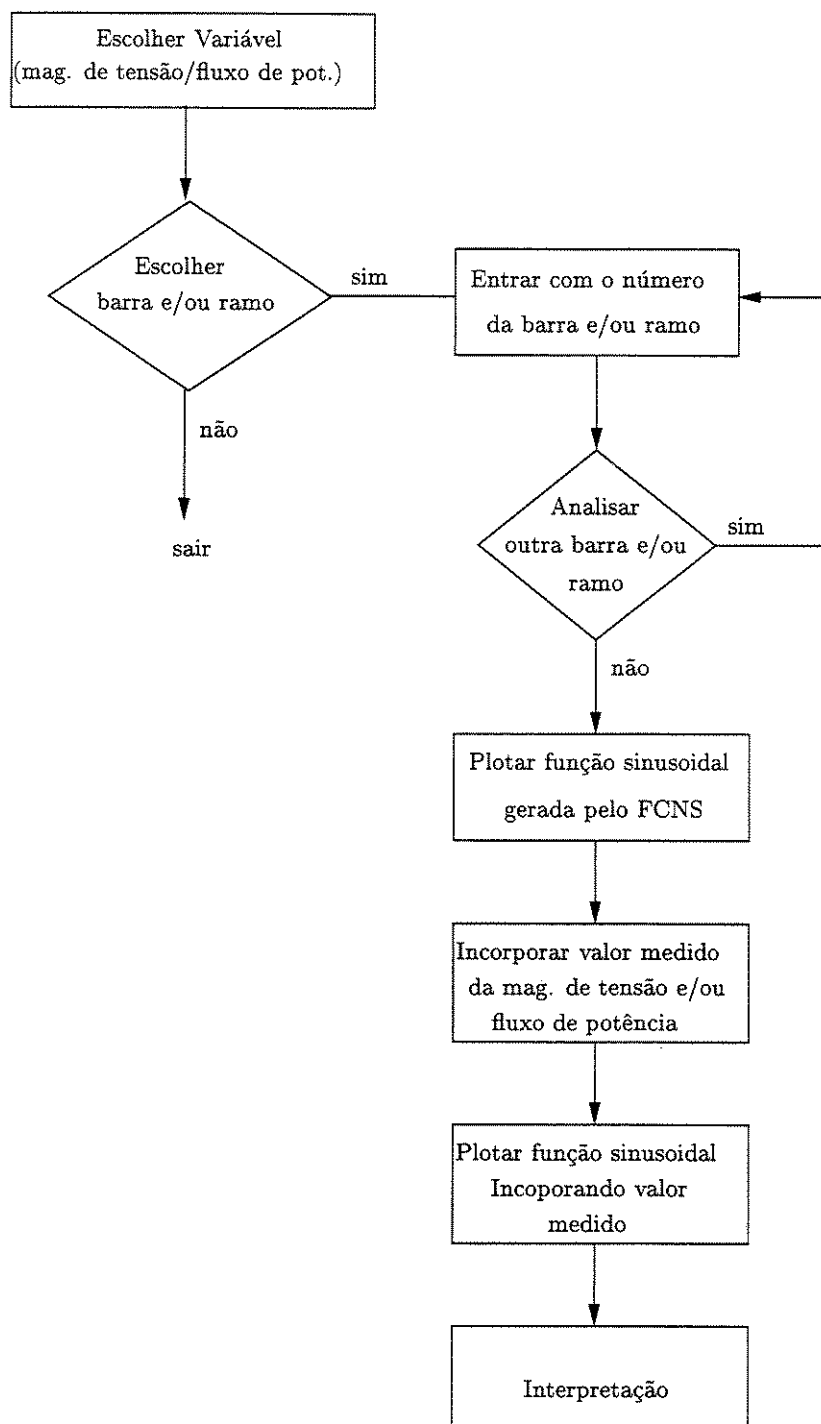


Figura 4.3: Fluxograma - tradução de resultados numéricos em lingüísticos

Capítulo 5

Resultados e Comentários

5.1 Considerações

5.1.1 Bancos de Dados

Em uma rede de energia elétrica, os dados geralmente apresentam-se de forma determinística. Neste caso, foi necessário estabelecer uma variação percentual com relação aos valores determinísticos, para que os dados se tornassem nebulosos.

Inicialmente, foi estabelecido que as potências ativa e reativa variariam em até 7% para se obter os desvios de potências em um sistema de 3 barras. Porém, considerando que as barras PV possuem condições de monitoramento para as potências, que são os dados considerados nebulosos, permitiu-se estreitar este limite de variação. Assim, para as barras PV e de referência considerou-se que estas sofreriam variações de até 3% e para as barras PQ uma variação em torno de 5%.

5.1.2 Dados de Entrada

Os dados de entrada que foram considerados nebulosos são as potências ativa e reativa nas barras, tanto para a geração como para a carga.

Os dados do sistema: impedâncias dos ramos, *shunt's* e valores de *tap* de transformadores não foram considerados nebulosos, porque isto implicaria em ter-se uma matriz Y com valores nebulosos e assim, a inversão desta matriz exigiria um esforço computacional muito grande, podendo até não ser possível executar.

5.2 Resultados

Para proporcionar uma visão global de como se traduz resultados numéricos em lingüísticos, é apresentada, passo a passo, a resolução de um sistema de três barras e três ramos.

5.2.1 Resultados para o Sistema de 3 Barras

A figura 5.1 apresenta o unifilar da rede de 3 barras.

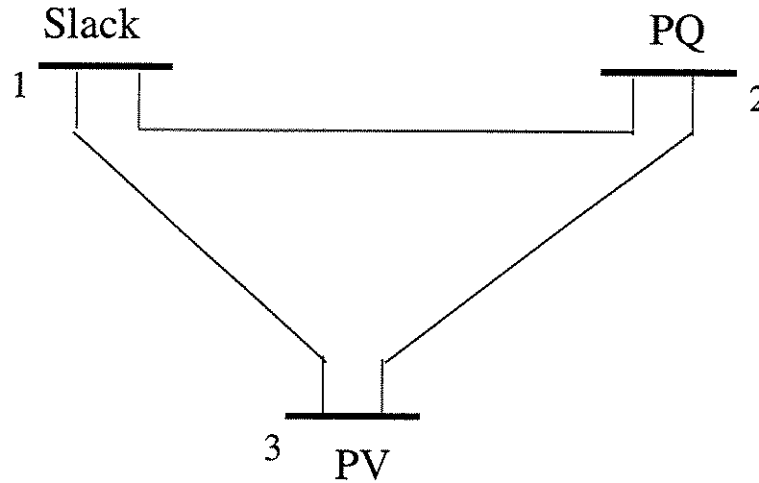


Figura 5.1: Rede de 3 barras

Nas tabelas a seguir, tem-se os dados de barras e de ramos.

Tabela 5.1: Dados de barras

Barra	Tipo	V (pu)	θ (rad)	P(pu)	Q(pu)
1	V θ	1,0	0.0	-	-
2	PQ	-	-	-0,05	-0,02
3	PV	0,98	-	-0,15	-

Tabela 5.2: Dados de ramos

Ramo	r	x	b^{sh}
1-2	0,10	1,00	0,01
1-3	0,20	2,00	0,02
2-3	0,10	1,00	0,01

Agora, aplica-se o algoritmo computacional utilizando o FCSN. Para esta aplicação necessita-se simular o FCNR até o momento do cálculo das magnitudes e dos ângulos das tensões nodais. A simulação completa do FCNR para esta rede encontra-se no apêndice C.

Tabela 5.3: Magnitudes e ângulos - FCNR

Barra	V (pu)	θ (rad)
1	1,0000	-0,0000
2	0,9827	-0,1153
3	0,9800	-0,1809

A tabela 5.3 apresenta os resultados para as magnitudes e ângulos das tensões nodais obtidos pelo FCNR. Estes são os valores de m das distribuições de possibilidades para os ângulos e para as magnitudes das tensões nodais.

Para cálculos dos desvios destas grandezas, deve-se primeiro obter os desvios das injeções líquidas das potências, que correspondem às distribuições de possibilidades para as potências ativa (tabela 5.4) e reativa (tabela 5.5).

Tabela 5.4: Distribuição de possibilidades para potência ativa(pu)

Barra	Tipo	Geração		Carga	
		m	α	m	α
1	Slack	-	-	0,0	0,0
2	PQ	0,0	0,0	0,05	0,0035
3	PV	0,0	0,0	0,15	0,0105

Tabela 5.5: Distribuição de possibilidades para potência reativa(pu)

Barra	Tipo	Geração		Carga	
		m	α	m	α
1	Slack	-	-	0,0	0,0
2	PQ	0,0	0,0	0,02	0,0014
3	PV	0,0	0,0	0,0	0,0

Em seguida, multiplica-se estes desvios pela inversa da matriz Jacobiana da última iteração do FCNR, obtendo-se os desvios para as magnitudes e os ângulos das tensões nodais, ou seja, as distribuições de possibilidades destas variáveis na forma sinusoidal (tabela 5.6).

Tabela 5.6: Magnitudes e ângulos nas barras para o FCNS

Barra	Magnitudes(pu)		Ângulos(rad)	
	m	α	m	α
1	1,0000	0,0000	0,0000	0,00000
2	0,9827	0,00156	-0,1153	0,00830
3	0,9800	0,00000	-0,1809	0,01315

Em seguida, determina-se os fluxos de potências nos ramos (tabelas 5.7 e 5.8), executando os cálculos com as expressões (5.1) e (5.2):

$$\tilde{P}_{km} = \tilde{V}_k^2 \otimes g_{km} \otimes tap_{km}^2 \ominus tap_{km} \otimes \tilde{V}_k \otimes \tilde{V}_m \otimes (g_{km} \otimes \cos(\tilde{\theta}_{km}) \oplus b_{km} \otimes \sin(\tilde{\theta}_{km})) \quad (5.1)$$

$$\tilde{P}_{mk} = \tilde{V}_m^2 \otimes g_{km} \otimes tap_{km} \ominus \tilde{V}_k \otimes \tilde{V}_m \otimes tap_{km} \otimes (g_{km} \otimes \cos(\tilde{\theta}_{km}) \ominus b_{km} \otimes \sin(\tilde{\theta}_{km}))$$

$$\tilde{Q}_{km} = \tilde{V}_k^2 \otimes (b_{km} \oplus b_{km}^{sh}) \ominus tap_{km}^2 \otimes tap_{km} \ominus \tilde{V}_k \otimes \tilde{V}_m \otimes (g_{km} \otimes \sin(\tilde{\theta}_{km}) \ominus b_{km} \otimes \cos(\tilde{\theta}_{km}))$$

$$\tilde{Q}_{mk} = \tilde{V}_m^2 \otimes (b_{km} \oplus b_{km}^{sh}) \oplus tap_{km} \otimes \tilde{V}_k \otimes \tilde{V}_m \otimes tap_{km} \otimes (g_{km} \otimes \sin(\tilde{\theta}_{km}) \oplus b_{km} \otimes \cos(\tilde{\theta}_{km})) \quad (5.2)$$

Tabela 5.7: Fluxo ativo (pu) nos ramos

Ramo	P_{km}		P_{mk}	
	m	α	m	α
1-2	0,1143	0,0081	-0,1130	0,0076
1-3	0,0891	0,0064	-0,0874	0,0062
2-3	0,0630	0,0046	-0,0626	0,0043

Tabela 5.8: Fluxo reativo (pu) nos ramos

Ramo	Q_{km}		Q_{mk}	
	m	α	m	α
1-2	0,00236	0,0014	-0,00880	0,0002
1-3	-0,01091	0,0005	-0,01227	0,0018
2-3	-0,01120	0,0014	-0,00396	0,0023

Finalizando, procede-se os cálculos das potências geradas nas barras e das perdas ativas nos ramos.

$$\begin{aligned}\tilde{P}_k &= \tilde{V}_k \otimes \sum_{m \in K} \tilde{V}_m \otimes (G_{km} \otimes \cos \tilde{\theta}_{km} \oplus B_{km} \otimes \sin \tilde{\theta}_{km}) \\ \tilde{Q}_k &= \tilde{V}_k \otimes \sum_{m \in K} \tilde{V}_m \otimes (G_{km} \otimes \sin \tilde{\theta}_{km} \ominus B_{km} \otimes \cos \tilde{\theta}_{km})\end{aligned}\quad (5.3)$$

Tabela 5.9: Potências ativa e reativa (pu) geradas nas barras

Barras	Ativa		Reativa	
	m	α	m	α
1	0,2033	0,01451	-0,0086	0,00220
3	-	-	-0,0162	0,00218

$$\tilde{P}_{Perdas}^{km} = g_{km} \otimes \tilde{V}_k^2 + g_{km} \otimes \tilde{V}_m^2 \otimes tap_{km}^2 - 2 \otimes tap_{km}^2 \otimes \tilde{V}_k \otimes \tilde{V}_m \otimes g_{km} \otimes \cos(\tilde{\theta}_{km}) \quad (5.4)$$

Tabela 5.10: Perdas ativas na transmissão(pu)

Ramos	Perdas	
	m	α
1-2	0,001321	0,00018893
1-3	0,001603	0,00022952
2-3	0,000411	0,00005932

Ainda com relação à função sinusoidal pode-se utilizar a metodologia discreta (FCSD). Este método é idêntico ao FCSN até o momento em que são calculadas as distribuições de possibilidades para as magnitudes e ângulos das tensões, ressaltando que é necessária a execução completa do FCNR para a obtenção dos valores dos fluxos de potência, das potências nas barras e das perdas na transmissão, pois estes serão os respectivos valores de m para estas variáveis.

A seguir, são efetuados os cálculos dos indicadores que informam como as magnitudes e os ângulos se comportam com as variações das potências. Para este procedimento deve-se primeiramente obter os vetores com os desvios de potências $\Delta \underline{P}_{sinal}$ e $\Delta \underline{Q}_{sinal}$ (equação 5.5). Na sequência obtém-se os indicadores (equação 5.6).

$$\begin{aligned}\Delta \underline{P}_{sinal} &= (P_{gesp} + \alpha_{Pgesp}) - (P_{cesp} + \alpha_{Pcesp}) - P_{calcatual} \\ \Delta \underline{Q}_{sinal} &= (Q_{gesp} + \alpha_{Qgesp}) - (Q_{cesp} + \alpha_{Qcesp}) - Q_{calcatual}\end{aligned}\quad (5.5)$$

$$\begin{bmatrix} \alpha_{\theta sinal} \\ \alpha_{v sinal} \end{bmatrix} = [J]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \underline{P} \\ \Delta \underline{Q} \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

O conteúdo da tabela (5.11) pode parecer incoerente, pois observando os valores das magnitudes, nota-se que o menor valor está como máximo e o maior como mínimo. No entanto, deve-se considerar que a tabela refere-se ao carregamento do sistema, ou seja, o *min* está se referindo ao mínimo carregamento do sistema, e este mesmo tipo de análise é feito para o máximo carregamento. Do mesmo modo se comportam as demais variáveis.

Tabela 5.11: Magnitudes e ângulos das tensões nodais

Barra	Magnitudes		Ângulos	
	min	max	min	max
1	0,9843	0,9812	-0,1070	-0,1235
2	-	-	-0,1678	-0,1940

Com os valores máximos e mínimos para os ângulos e magnitudes das tensões, pode-se calcular os valores máximos e mínimos para as outras variáveis do fluxo de carga (tabelas 5.12 a 5.15).

Tabela 5.12: Fluxos ativos máximos e mínimos nos ramos (pu)

Ramo	P_{km}		P_{mk}	
	max	min	max	min
1-2	0,1223	0,1062	-0,1208	-0,1051
1-3	0,0954	0,0827	-0,0936	-0,0813
2-3	0,0673	0,0586	-0,0669	-0,0582

Tabela 5.13: Fluxos reativos máximos e mínimos nos ramos (pu)

Ramo	Q_{km}		Q_{mk}	
	max	min	max	min
1-2	0,0040	0,0007	-0,0085	-0,0090
1-3	-0,0104	-0,0114	-0,0105	-0,0140
2-3	-0,0128	-0,0095	-0,0017	-0,0062

Tabela 5.14: Potências ativa e reativa máximas e mínimas na barras (p.u.)

Barra	Potência ativa		Potência Reativa	
	max	min	max	min
1	0,2177	0,1888	-0,0063	-0,0107
2	-	-	-0,0122	-0,0202

Tabela 5.15: Perdas máximas e mínimas na transmissão (pu)

Ramo	Perdas	
	max	min
1-2	0,001516	0,001139
1-3	0,001839	0,001382
2-3	0,000472	0,000354

Com todos os valores máximos, mínimos e médios das variáveis (fornecidos pelo FCNR), pode-se calcular os desvios (equação 5.7) e obter as distribuições de possibilidades para todas estas variáveis do fluxo de carga (tabelas 5.16 a 5.19).

$$\alpha_{P_{km}} = \frac{(|P_{kmmaz} - P_{kmmmed}| + |P_{kmmmin} - P_{kmmmed}|)}{2} \quad (5.7)$$

Tabela 5.16: Fluxos ativos nos ramos (pu)

Ramo	P_{km}		P_{mk}	
	m	α	m	α
1-2	0,1143	0,0081	-0,1130	-0,0079
1-3	0,0890	0,0064	-0,0874	-0,0061
2-3	0,0630	0,0044	-0,0626	-0,0043

Tabela 5.17: Fluxos reativos nos ramos (pu)

Ramo	Q_{km}		Q_{mk}	
	m	α	m	α
1-2	0,00234	0,0017	-0,0088	-0,0003
1-3	-0,01091	-0,0005	-0,0123	-0,0017
2-3	-0,0112	-0,0016	-0,0040	-0,0022

Tabela 5.18: Potências ativa e reativa geradas nas barras (pu)

Barra	Potência ativa		Potência Reativa	
	m	α	m	α
1	0,2033	0,01442	-0,0086	-0,02197
3	-	-	-0,0163	-0,004006

Tabela 5.19: Perdas na transmissão (pu)

Ramo	Perdas	
	m	α
1-2	0,001321	0,000188
1-3	0,001602	0,000229
2-3	0,000411	0,000059

Por se tratar de um sistema com dimensão reduzida, não é possível notar muitas diferenças entre os resultados do FCSN e do FCSD. No entanto, para redes com dimensões maiores tal diferença é perceptível.

5.2.1.1 Tradução dos Resultados Numéricos em Lingüísticos

A figura 5.2 mostra a distribuição de possibilidades (função sinusoidal) para a tensão na barra 2 do sistema de 3 barras. Nesta barra o valor de m da distribuição de possibilidades é igual a 0,9827pu que é a tensão na barra.

É interessante ressaltar que este desenvolvimento independe da metodologia de FCNS utilizada, porque as diferenças entre eles são observadas nas distribuições de possibilidades, e as funções traçadas, por dependerem das distribuições de possibilidades das variáveis, consequentemente apresentarão variações, o que não traz problemas ao se fazer a tradução, pois esta depende da variação do grau de pertinência.

Os resultados aqui apresentados, provêm da aplicação da metodologia discreta para se fazer a tradução, lembrando que esta metodologia minimiza os erros para baixos fluxos.

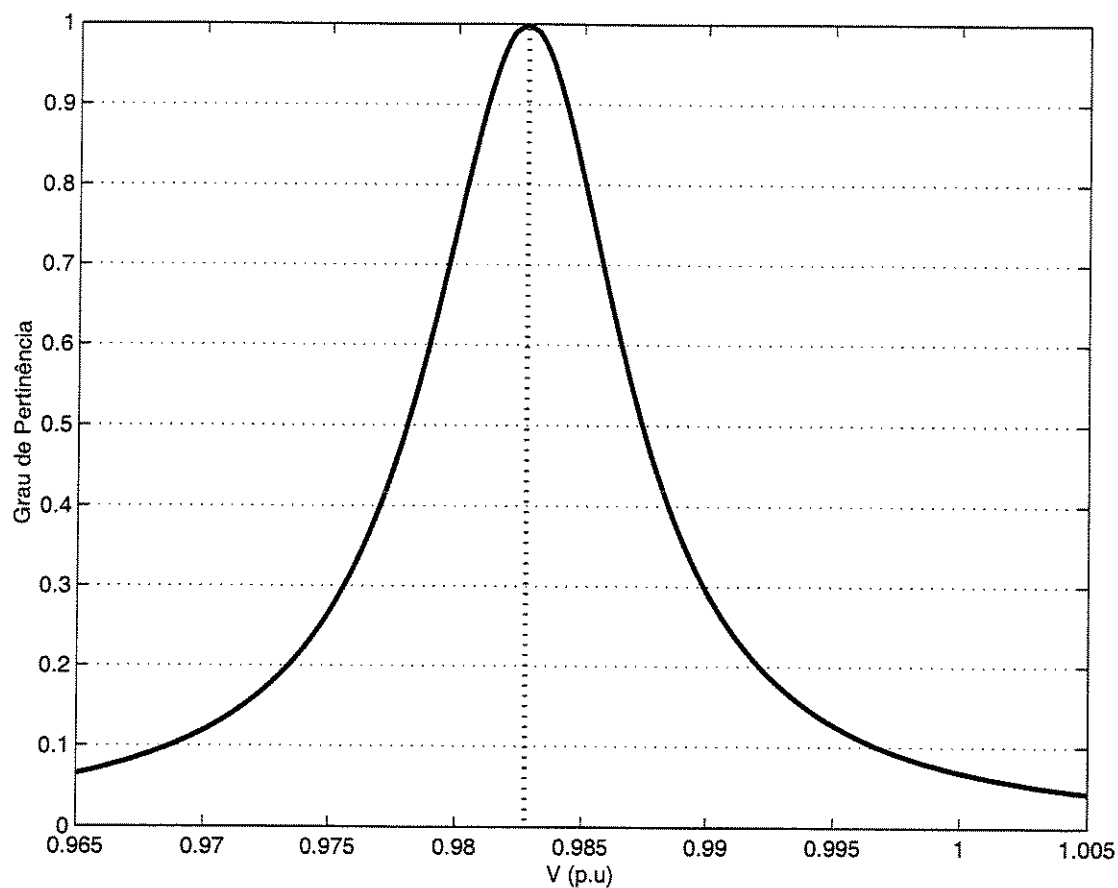


Figura 5.2: Distribuição de possibilidades para a tensão na barra 2

Suponhamos que ocorra uma variação no nível de tensão desta barra: de 0,9827pu para 0,9775pu. Esta queda de tensão é apresentada na figura 5.3, para que se possa fazer uma análise lingüística. Nesta figura tem-se a variação do grau de pertinência que foi apresentada no capítulo 4.

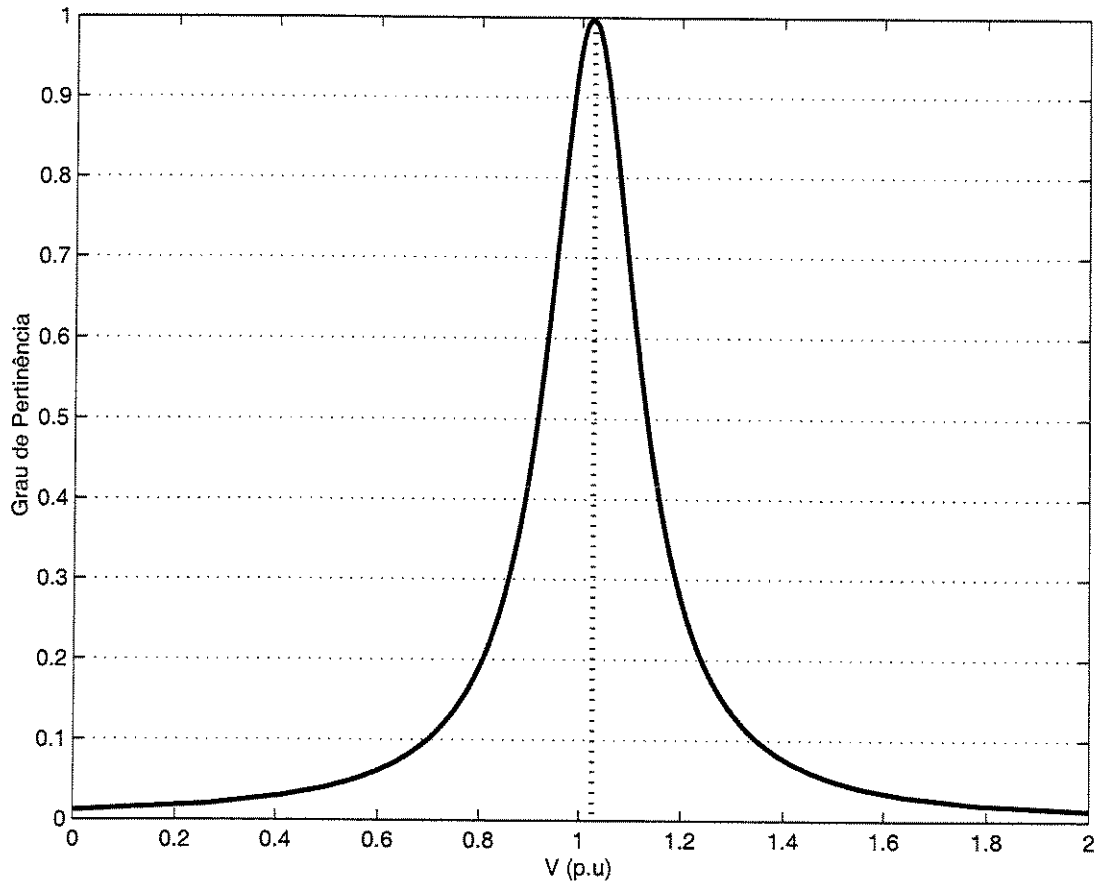


Figura 5.3: Análise da queda de tensão na barra 2

Esta simulação permite concluir que com a queda na magnitude de tensão na barra 2, o grau de pertinência para esta variação está em torno de 0,42, o que é considerado um resultado *ruim* ou seja, linguisticamente pode-se afirmar que “a tensão na barra 2 está ruim”.

Do mesmo modo, simula-se uma variação de fluxo de potência ativa, fazendo com que o resultado numérico seja transformado em resultado linguístico.

A figura 5.4 traz a distribuição de possibilidades para o fluxo de potência ativa no ramo 1-3 da rede de três barras. Neste ramo o valor de m da distribuição de possibilidades é o próprio fluxo de potência ativa no ramo, que é igual a 0,0891pu.

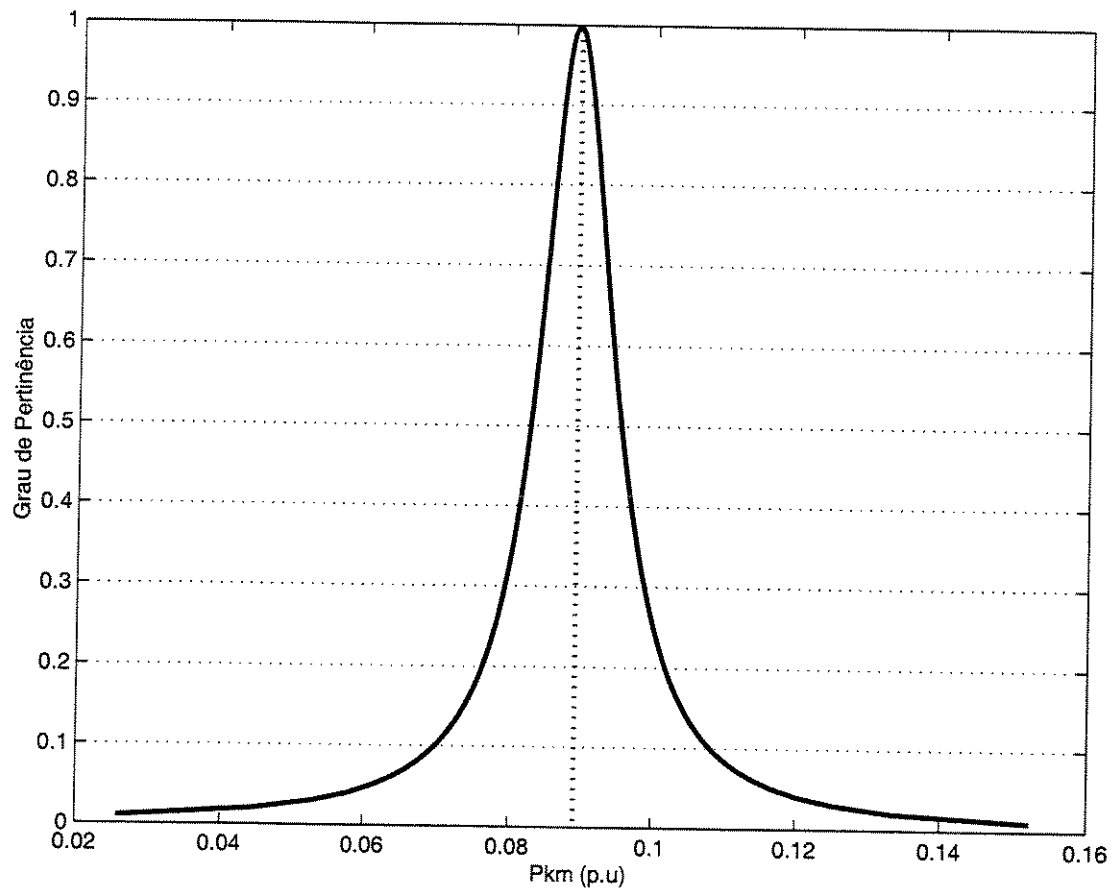


Figura 5.4: Distribuição de possibilidades para o fluxo de potência no ramo 1-3

A simulação considerou uma queda no fluxo de potência ativa de 0,0891pu para 0,0870pu. A figura 5.5 traz a função sinusoidal incorporando o valor medido do fluxo de potência ativa para o ramo 1-3, podendo-se observar a faixa de variação do grau de pertinência.

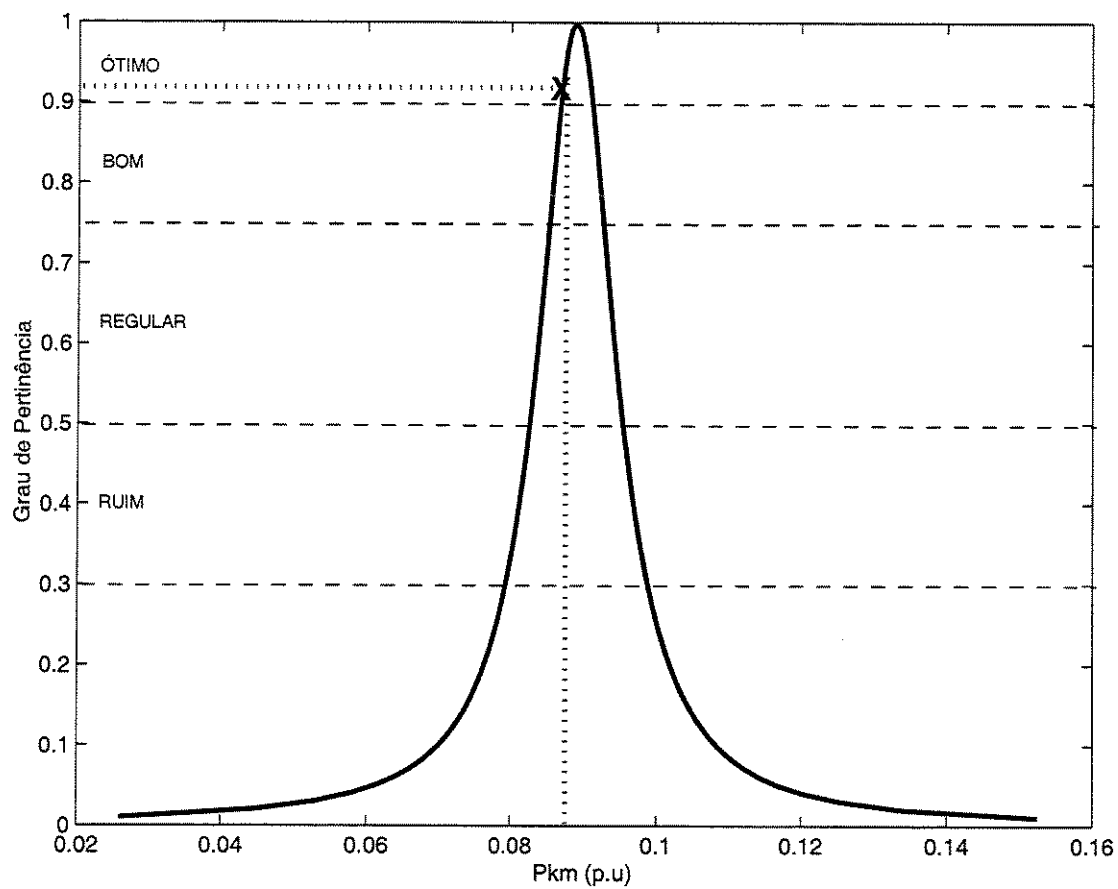


Figura 5.5: Análise da queda do fluxo de potência no ramo 1-3

Na figura 5.6 tem-se um destaque do valor medido, o que permite uma melhor análise do referido valor em relação ao grau de pertinência.

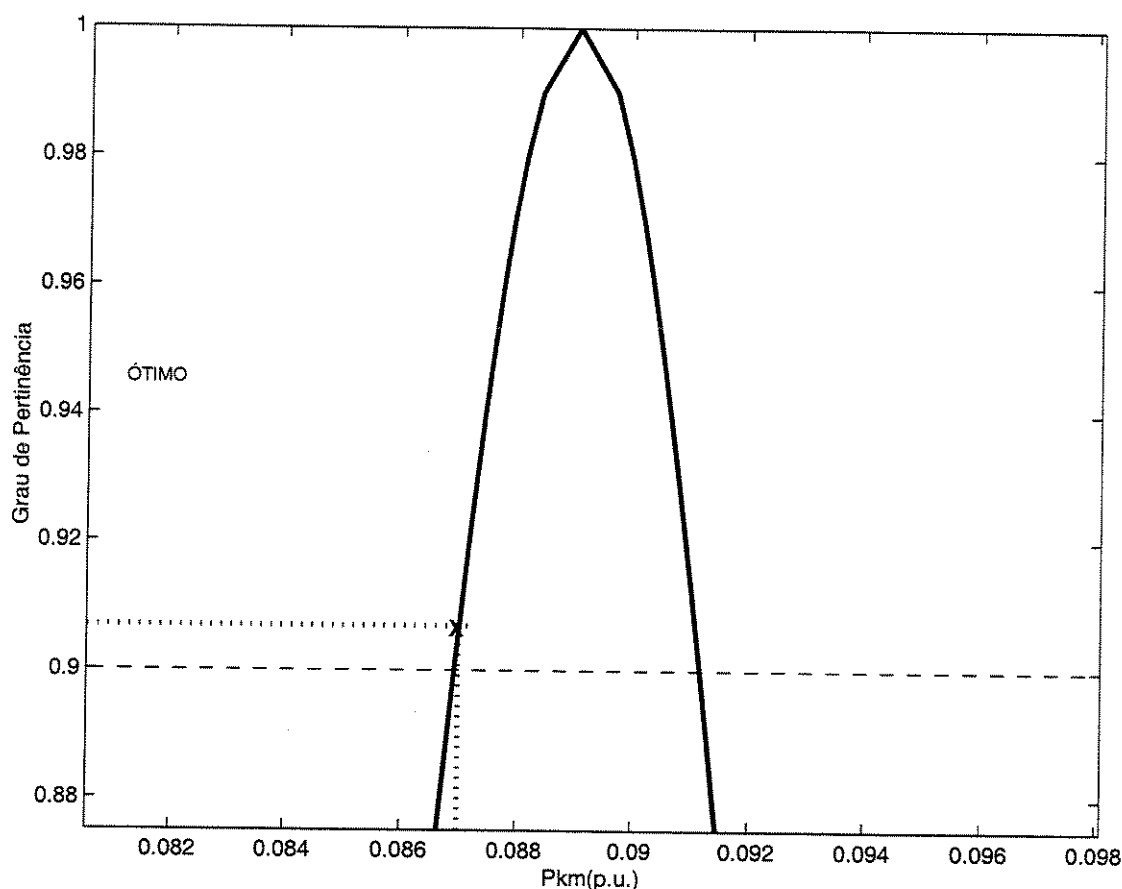


Figura 5.6: Destaque do fluxo de potência medido no ramo 1-3

Esta simulação permite concluir que embora o fluxo de potência tenha diminuído, ainda pode ser classificado como *ótimo*, ou seja, pode-se afirmar que “o fluxo de potência ativa no ramo 1-3 é ótimo”, pois o valor do fluxo de potência medido de 0,0870pu apresenta um grau de pertinência em torno de 0,906, e está no intervalo $[0,9 \quad 1,0]$ que foi previamente determinado.

Nos itens seguintes, são realizadas análises para os sistemas IEEE30 barras e IEEE57 barras, cujos resultados completos para os fluxos de carga (FCNR, FCNS e FCSD) encontram-se no Apêndice C.

5.2.2 Resultados para IEEE30

O sistema IEEE30 é um sistema formado por trinta barras e quarenta e um ramos, sendo que quatro destes ramos são transformadores. Este sistema foi escolhido por ser muito utilizado em simulações de fluxo de carga.

A tabela 5.20 apresenta os fluxos de potência ativa, obtidos na solução do FCNR, para dois ramos selecionados entre os mais carregados.

Tabela 5.20: Fluxos de potência ativa (MW)

Ramo	P_{km}	
	m	α
3-4	77,8812	3,5149
4-6	70,0739	2,7549
28-27	18,0955	0,9601

Para a análise deste sistema, simulou-se a saída de cada ramo individualmente. A simulação da saída do ramo 3-4 apresentou as seguintes variações nas magnitudes de tensão nas respectivas barras terminais: a tensão na barra 3 variou de 1,0210pu para 1,0609pu e para a barra 4 a variação foi de 1,0122pu para 1,0021pu.

As figuras 5.7 e 5.8 mostram as distribuições de possibilidades para as magnitudes de tensão nas barras 3 e 4 respectivamente, antes da saída do ramo.

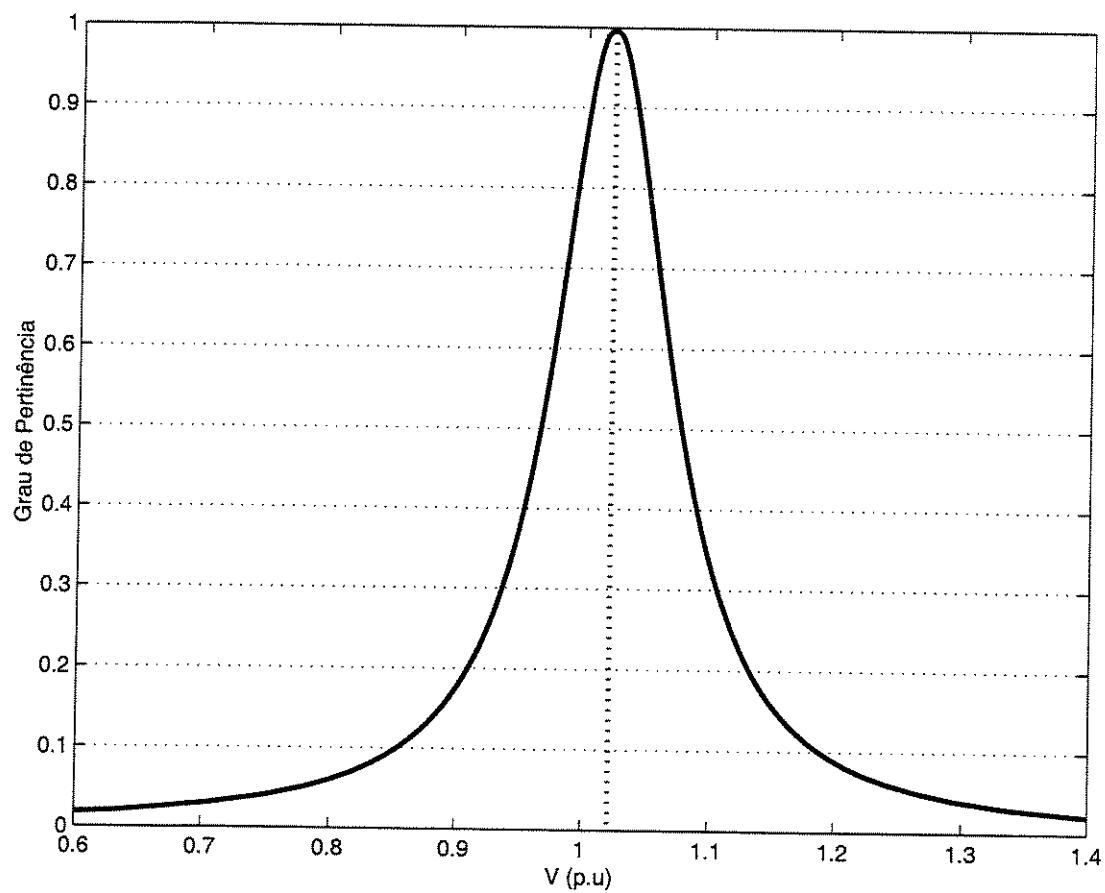


Figura 5.7: Distribuição de possibilidades para a tensão na barra 3

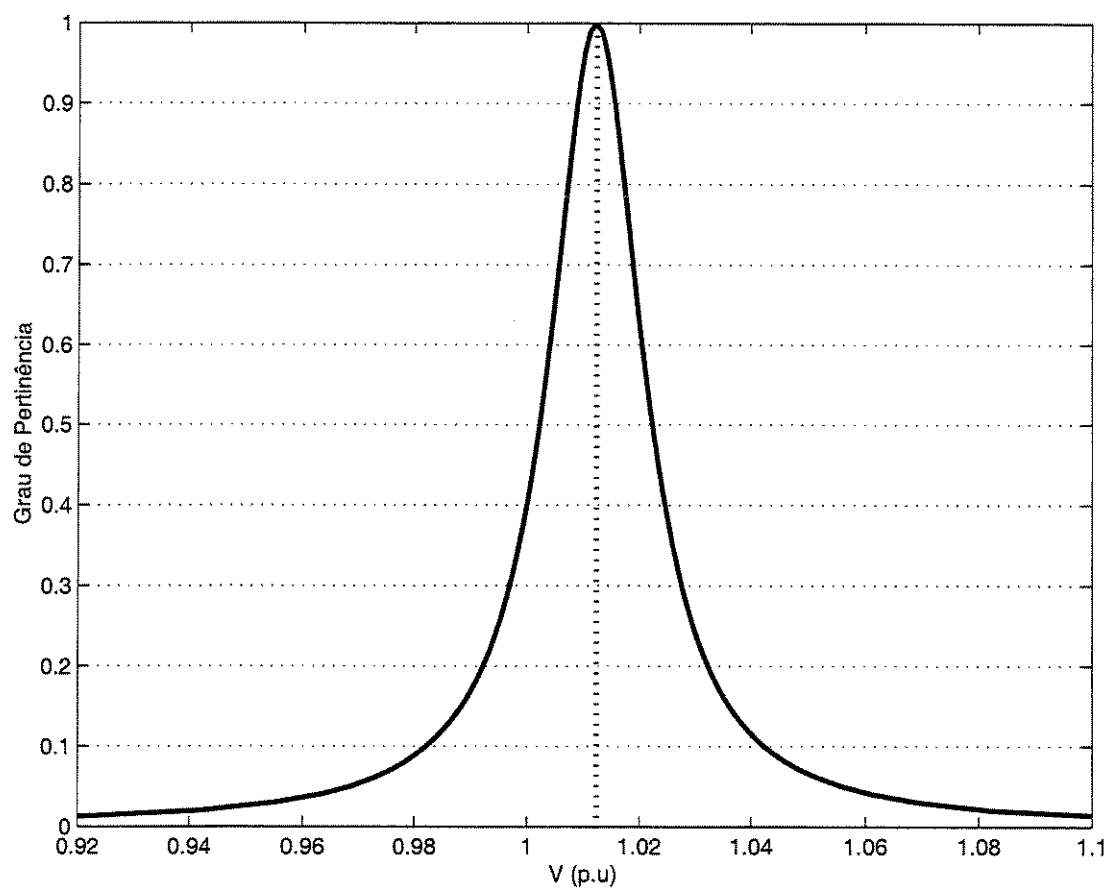


Figura 5.8: Distribuição de possibilidades para a tensão na barra 4

O aumento de tensão ocorrido na barra 3 é apresentado na figura 5.9, para que se possa fazer uma análise lingüística.

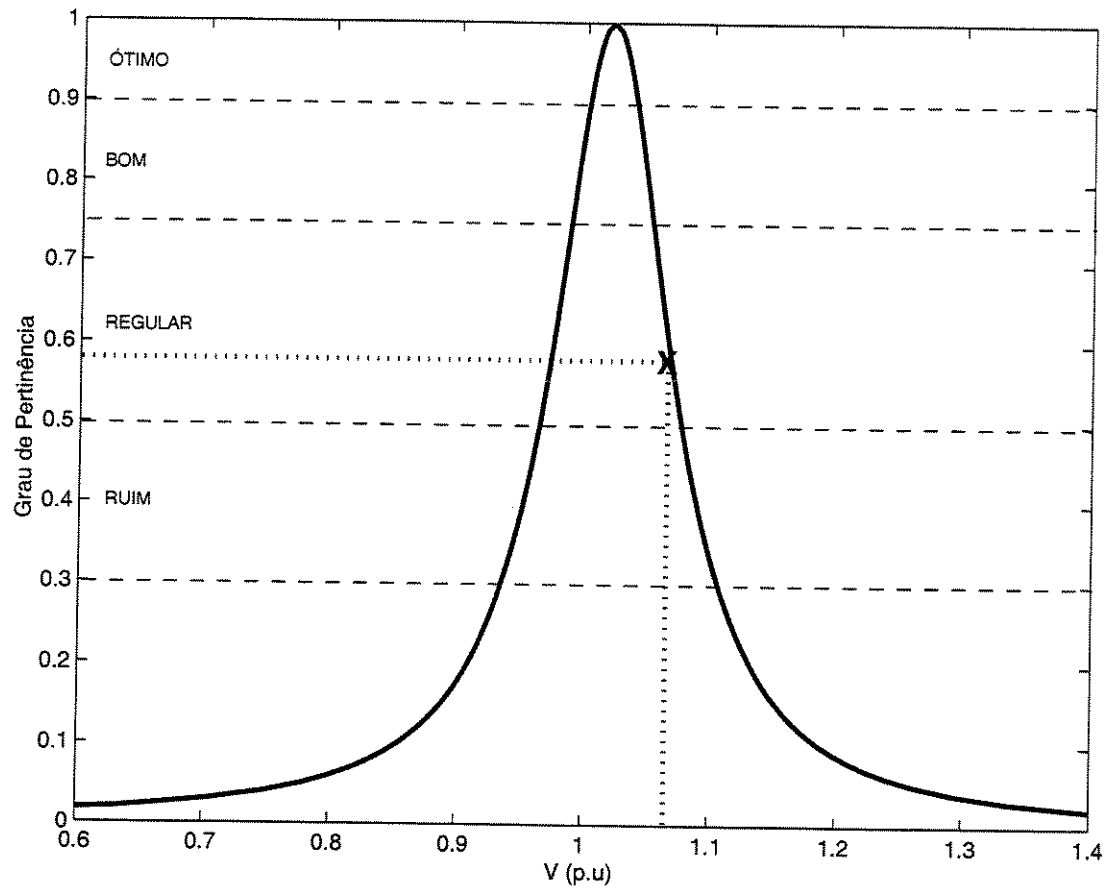


Figura 5.9: Análise da variação de tensão na barra 3

Na figura 5.10 tem-se um destaque do valor da tensão na barra 3 após a contingência, o que permite uma análise melhor do referido valor em relação ao grau de pertinência.

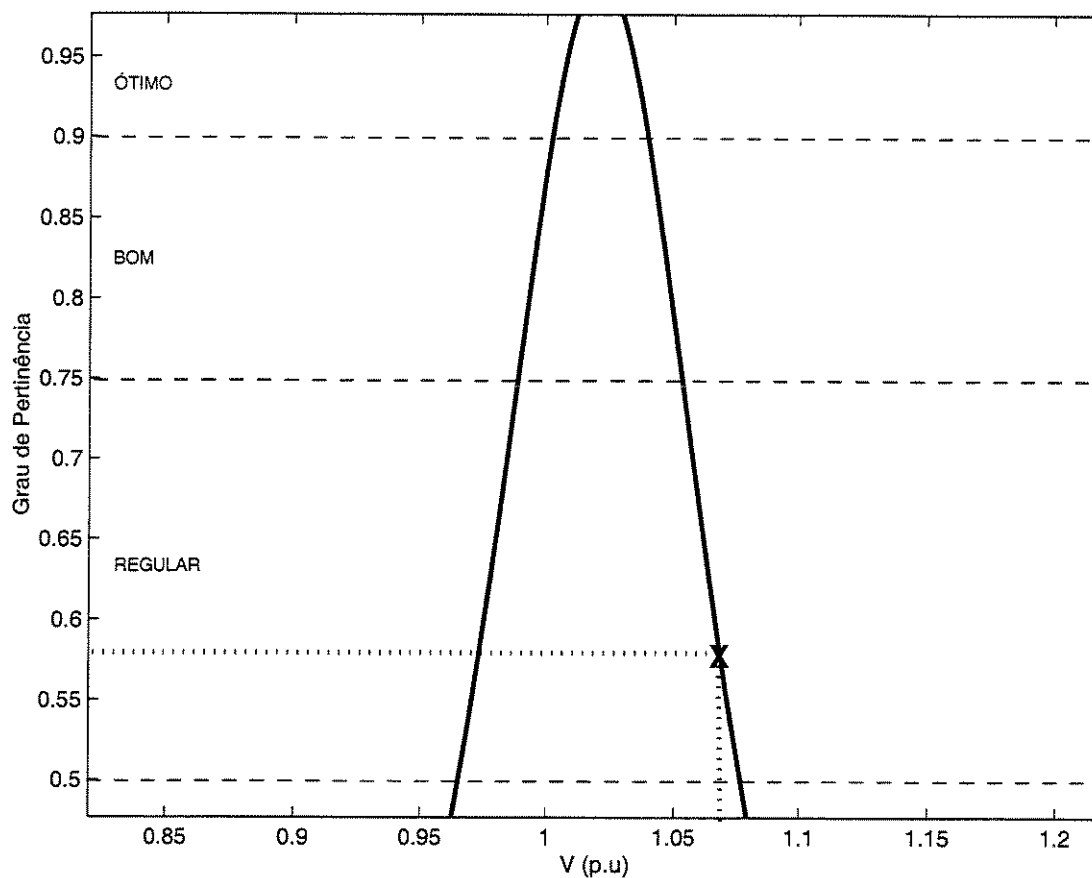


Figura 5.10: Detalhe da variação de tensão na barra 3

Conclui-se que após a simulação da contingência, a tensão na barra 3 apresenta um grau de pertinência em torno de 0,58, sendo considerado um resultado *regular* ou seja, linguisticamente pode-se dizer que “a tensão na barra 3 está regular”.

Agora faz-se uma análise da tensão na barra 4, na qual ocorreu uma queda de 1,0122pu para 1,0021pu, representada na figura 5.11. Após a saída do ramo 3-4, a tensão na barra 4 apresenta um grau de pertinência próximo de 0,51, o que é considerado *regular* ou seja, lingüísticamente pode-se afirmar que “a tensão na barra 4 está regular”.

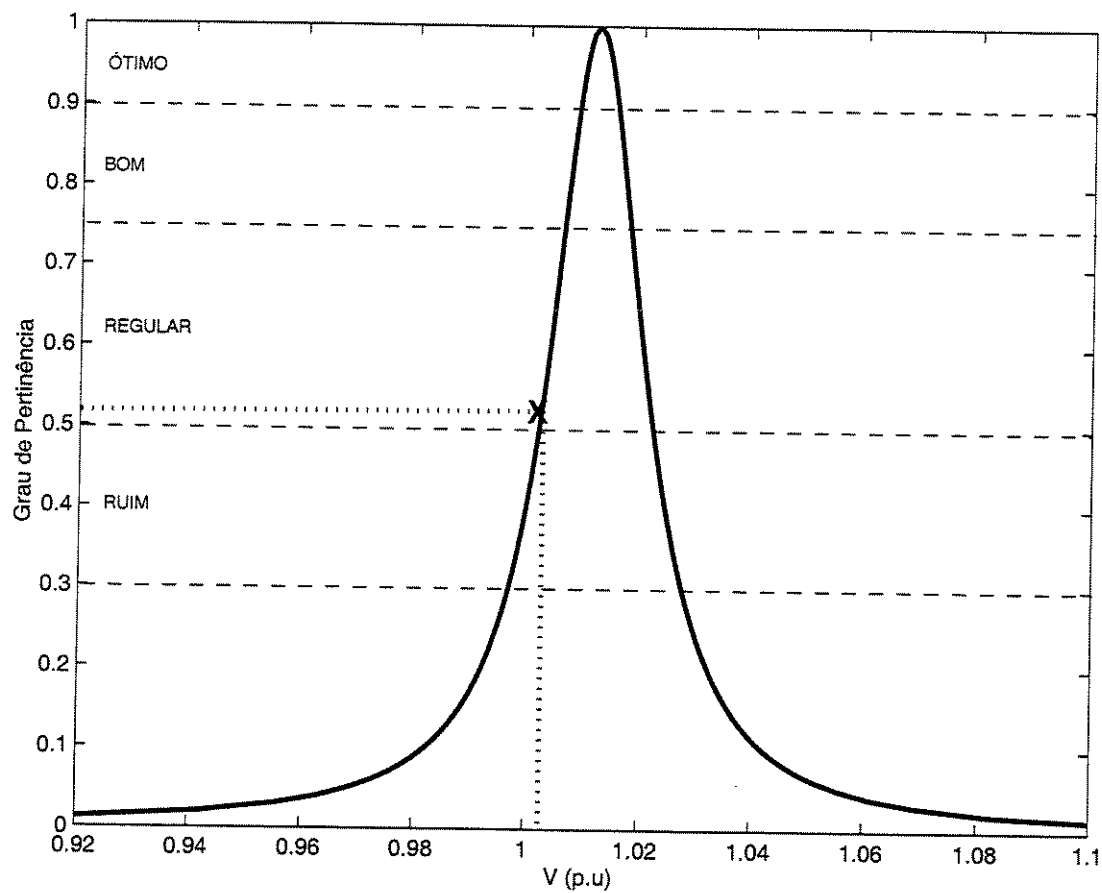


Figura 5.11: Análise da variação de tensão na barra 4

Antes de simular a contingência no ramo 4-6, as magnitudes de tensão nas barras terminais eram 1,0122 pu e 1,0106 pu, respectivamente. As figuras 5.12 e 5.13 apresentam as distribuições de possibilidades para as magnitudes de tensão nas barras 4 e 6, respectivamente.

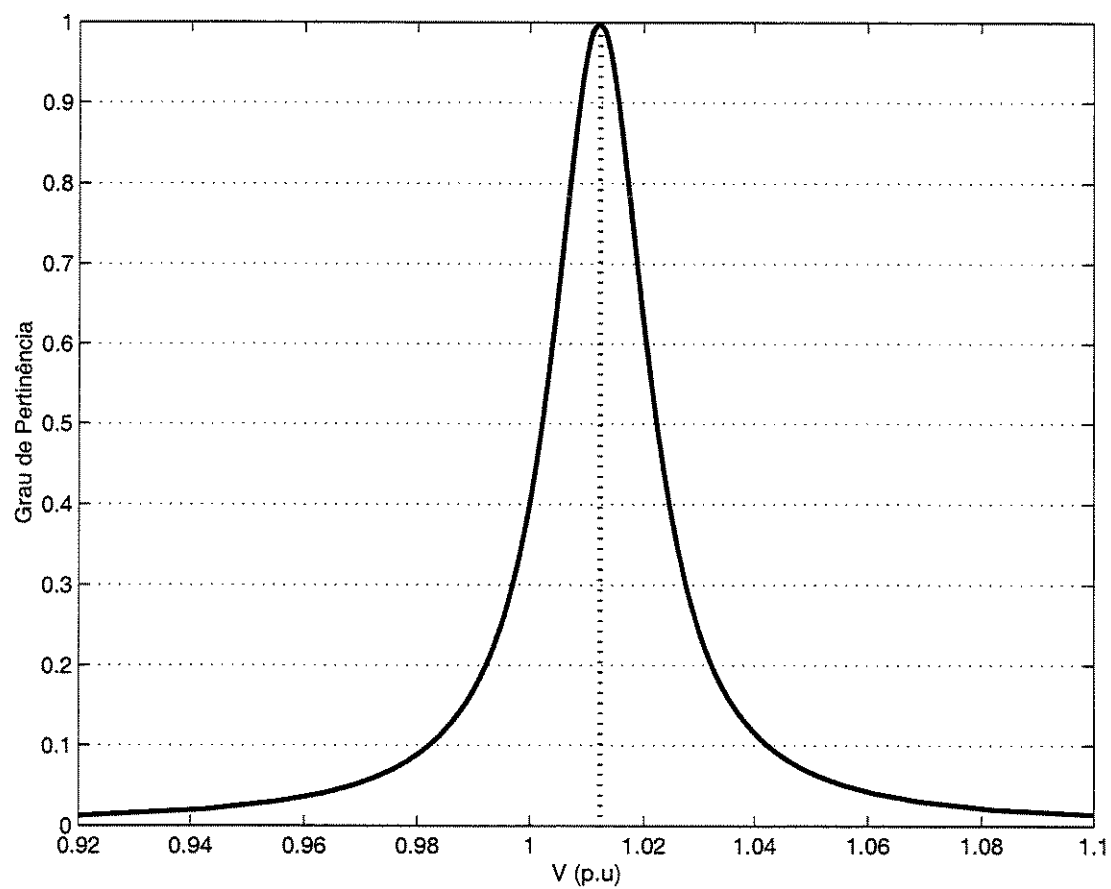


Figura 5.12: Distribuição de possibilidades para a magnitude de tensão na barra 4

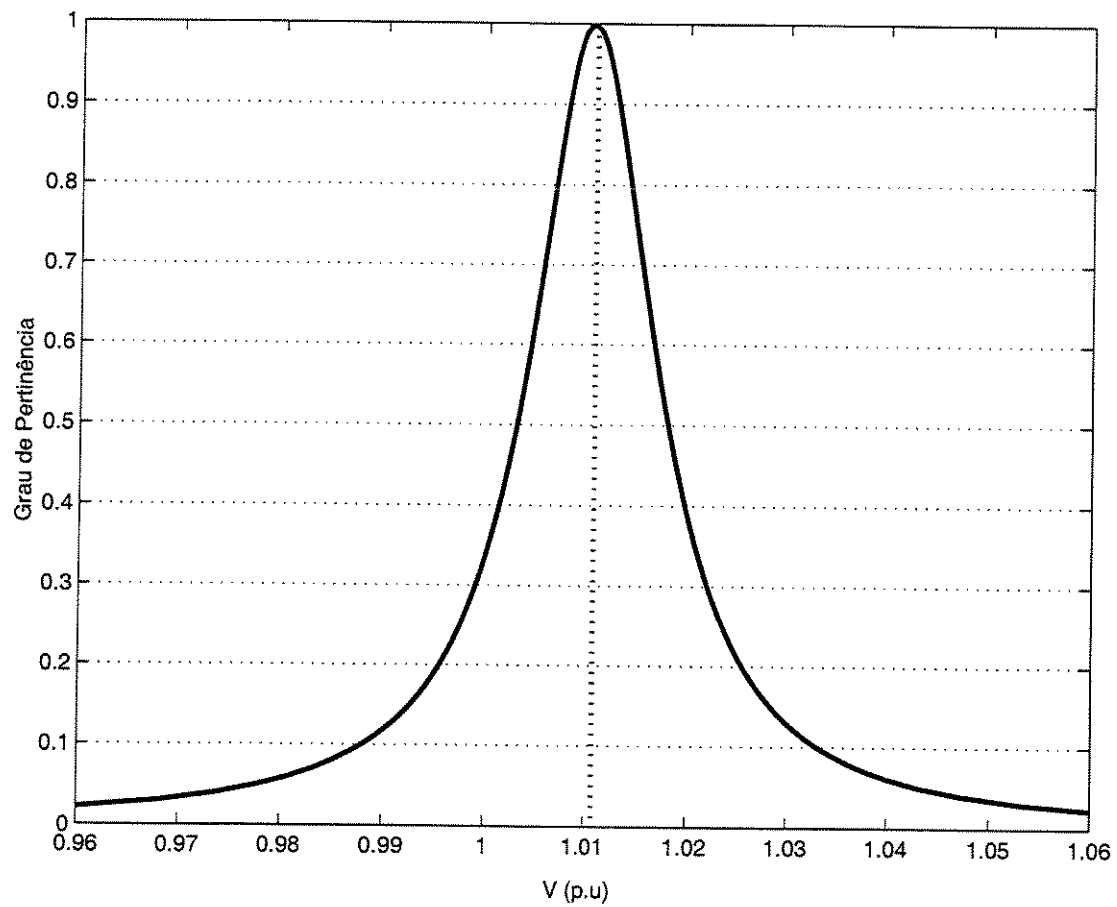


Figura 5.13: Distribuição de possibilidades para a magnitude de tensão na barra 6

Com a saída do ramo 4-6 a magnitude de tensão na barra 4 aumentou de 1,0122 pu para 1,0140 pu, representada na figura 5.14, sendo que o grau de pertinência para este aumento de tensão está em torno de 0,90.

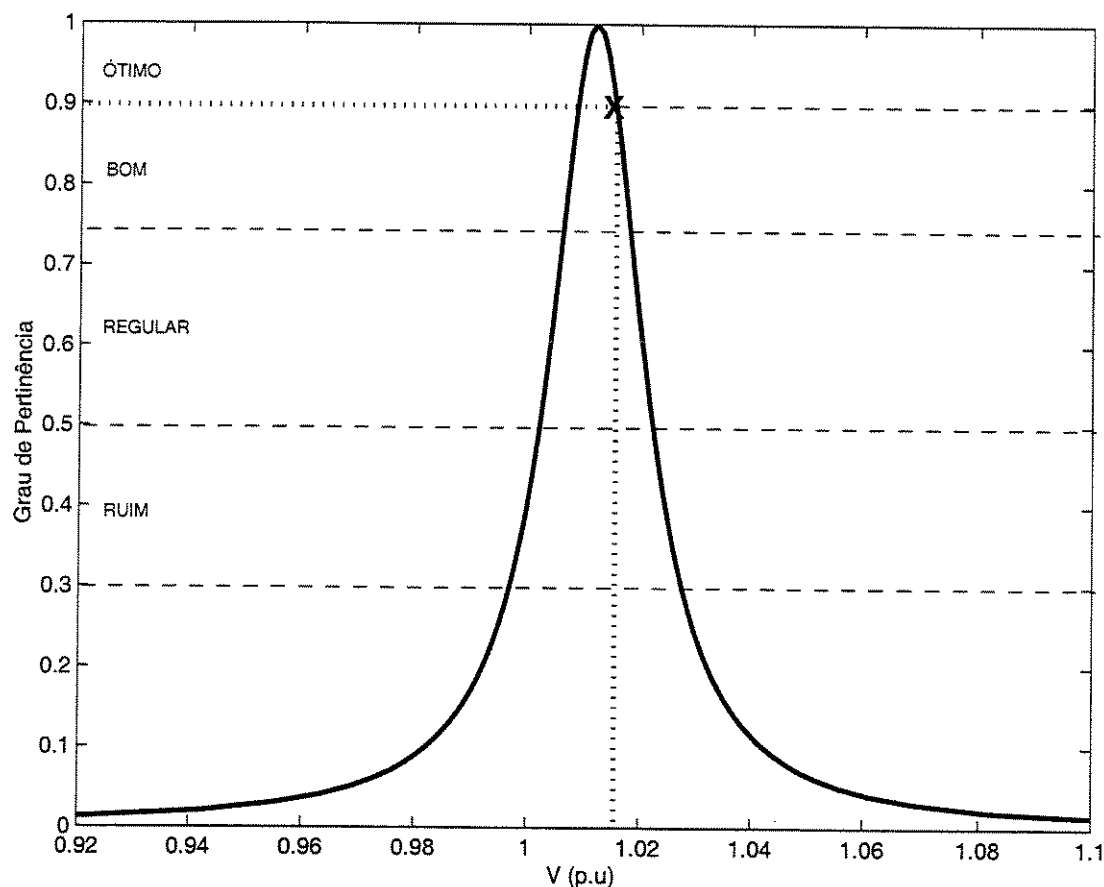


Figura 5.14: Análise da variação de tensão na barra 4

A figura 5.15 mostra em destaque este aumento de tensão. O grau de pertinência de 0,90 permite classificar a tensão como *ótima* ou seja, linguisticamente pode-se dizer que “a tensão na barra 4 está ótima”.

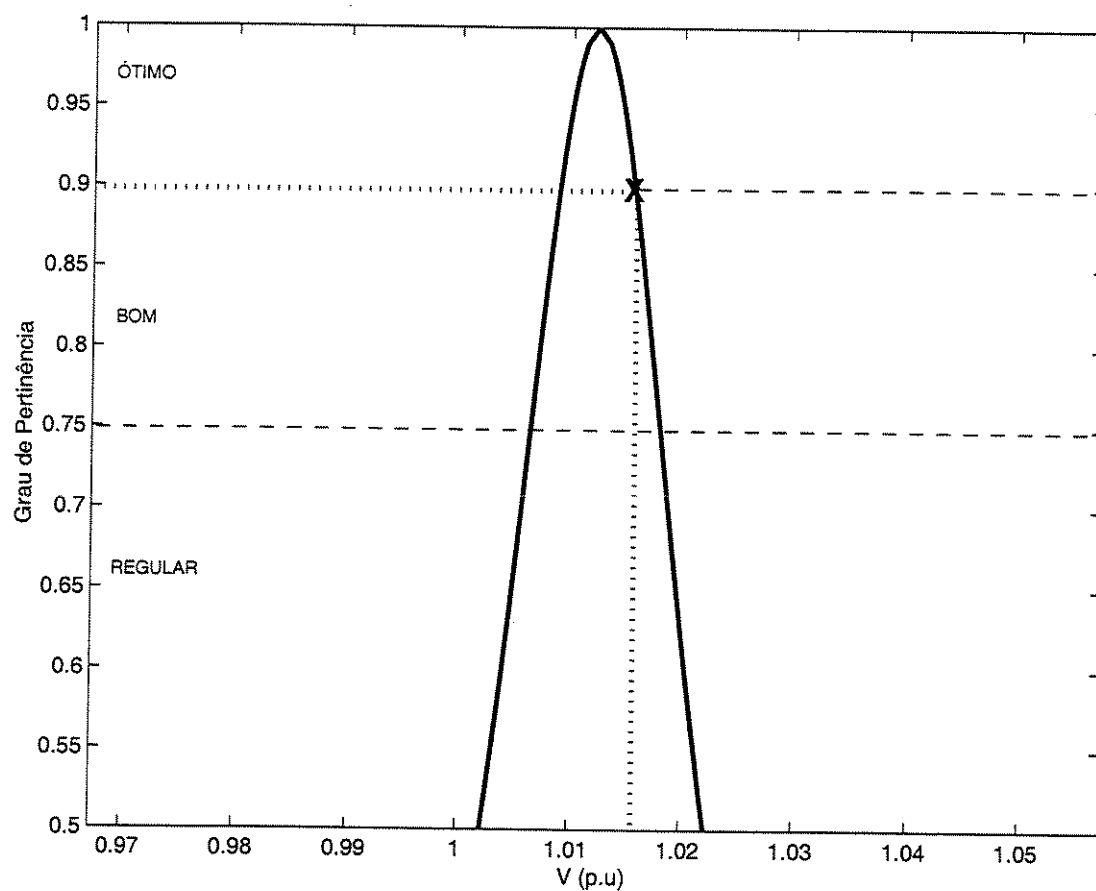


Figura 5.15: Destaque da variação de tensão na barra 4

Agora, analisando a tensão na barra 6, observa-se que houve uma queda na tensão para 1,0088 pu, como mostra a figura 5.16, e para esta tensão o grau de pertinência é aproximadamente 0,88.

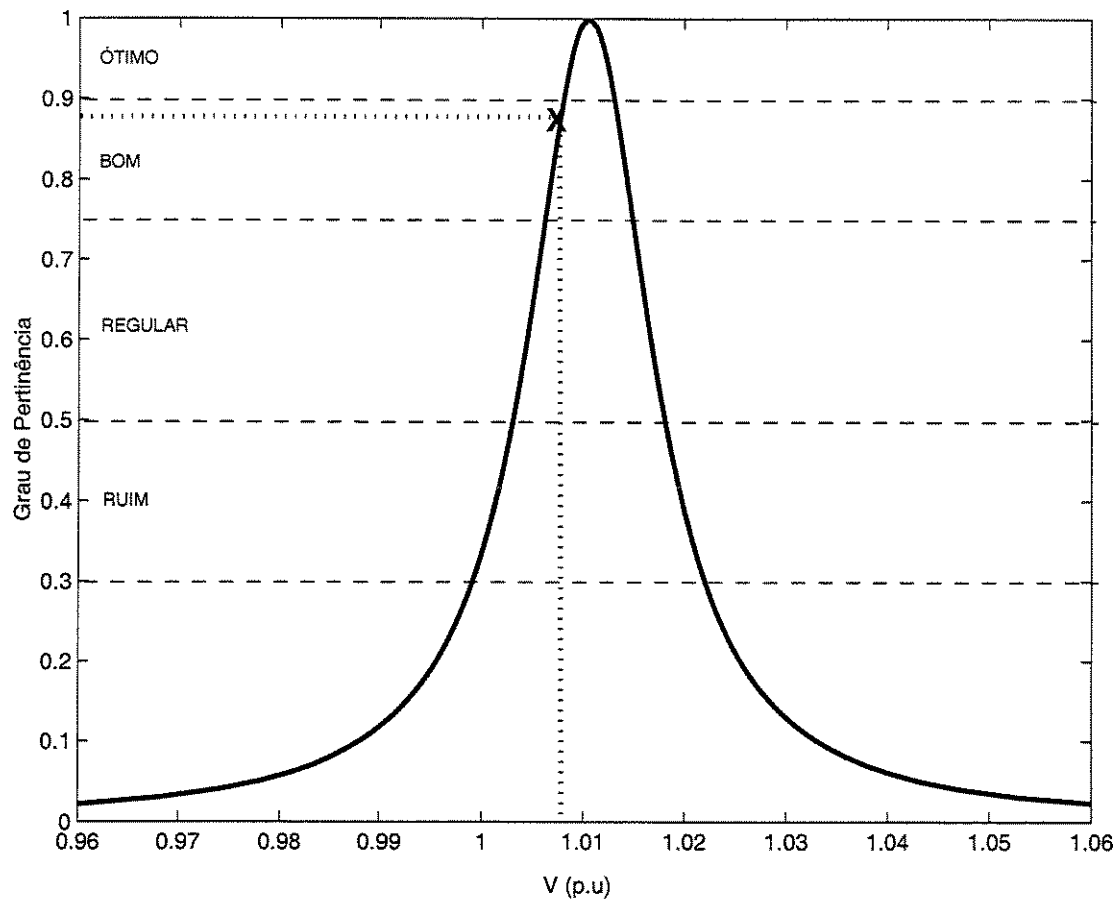


Figura 5.16: Análise da variação de tensão na barra 6

Na figura 5.17 tem-se um destaque da tensão na barra após a saída do ramo 4-6, o que permite uma melhor análise da variação de tensão em relação ao grau de pertinência. Para o grau de pertinência de 0,88 a tensão na barra pode ser classificada como boa ou seja, linguisticamente pode-se afirmar que “a tensão na barra 6 está boa”.

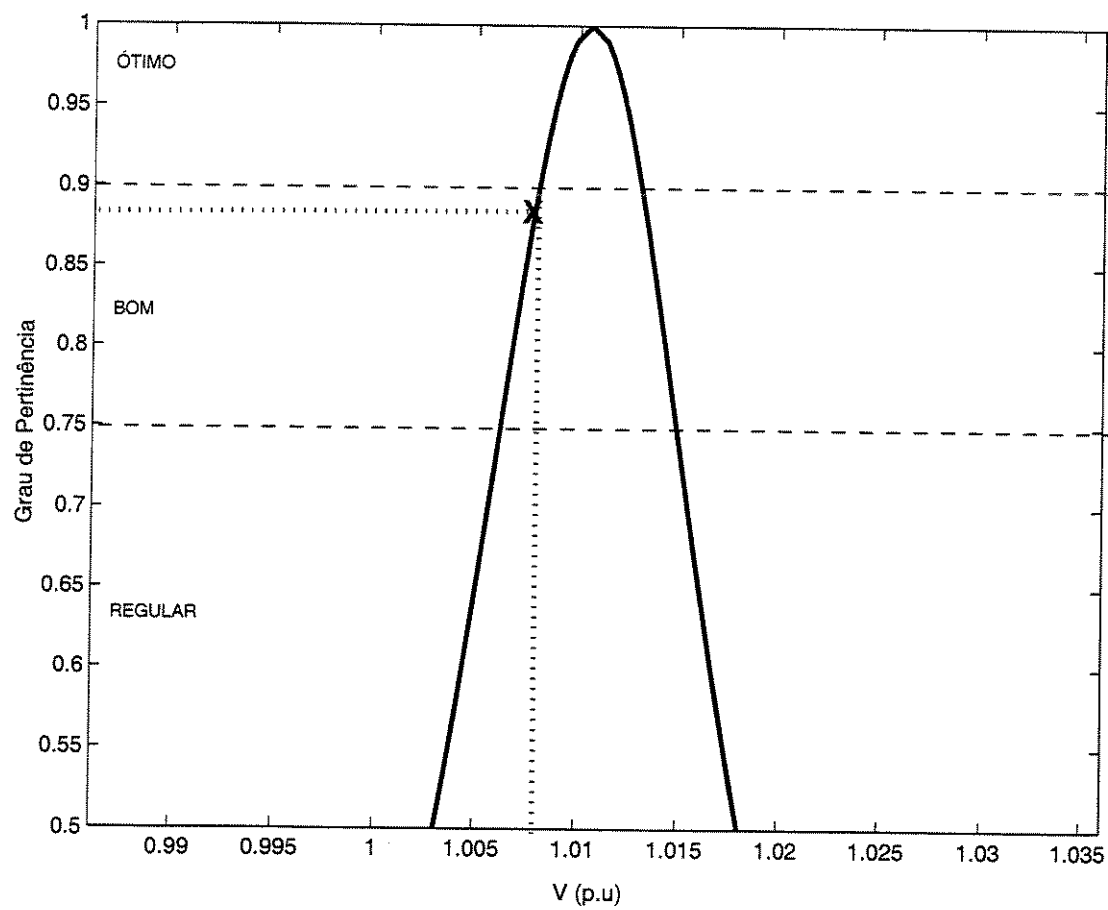


Figura 5.17: Destaque da variação de tensão na barra 6

Simulou-se também a saída do ramo 28-27. Para esta contingência observou-se as seguintes variações nas magnitudes de tensão das barras terminais: na barra 27 a tensão diminuiu de 1,0235pu para 0,900pu enquanto que na barra 28 aumentou de 1,0071pu para 1,0113pu.

As figuras 5.18 e 5.19 mostram as magnitudes de tensão nas barras 27 e 28 respectivamente, antes da saída do ramo.

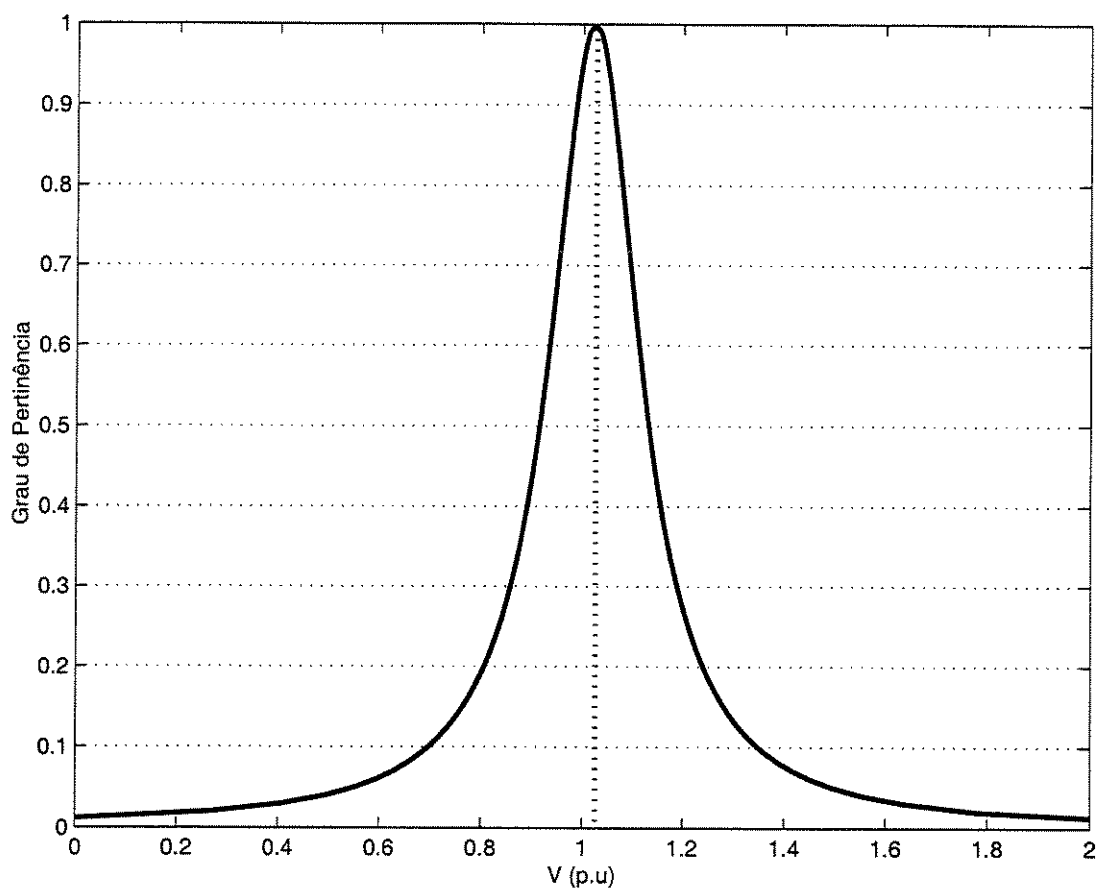


Figura 5.18: Distribuição de possibilidades para a tensão na barra 27

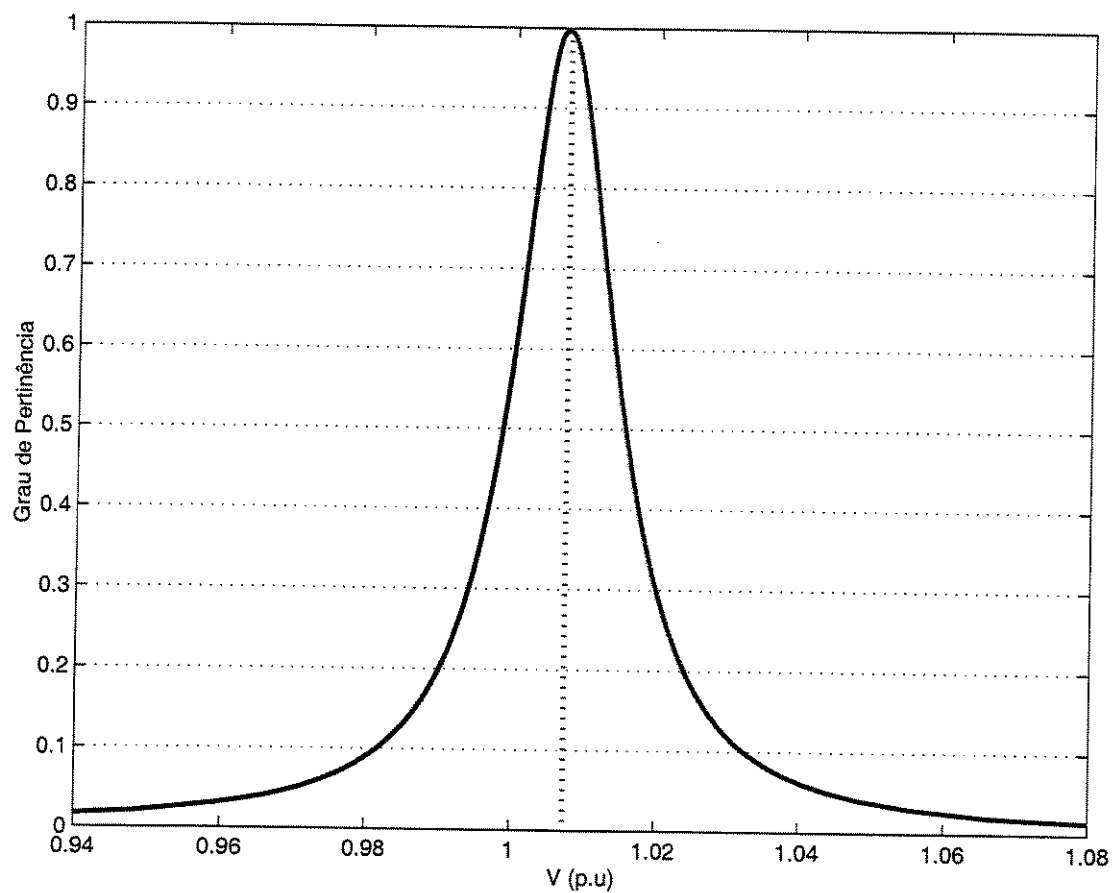


Figura 5.19: Distribuição de possibilidades para a tensão na barra 28

A queda na tensão ocorrida na barra 27 é apresentada na figura 5.20, para que se possa fazer uma análise lingüística.

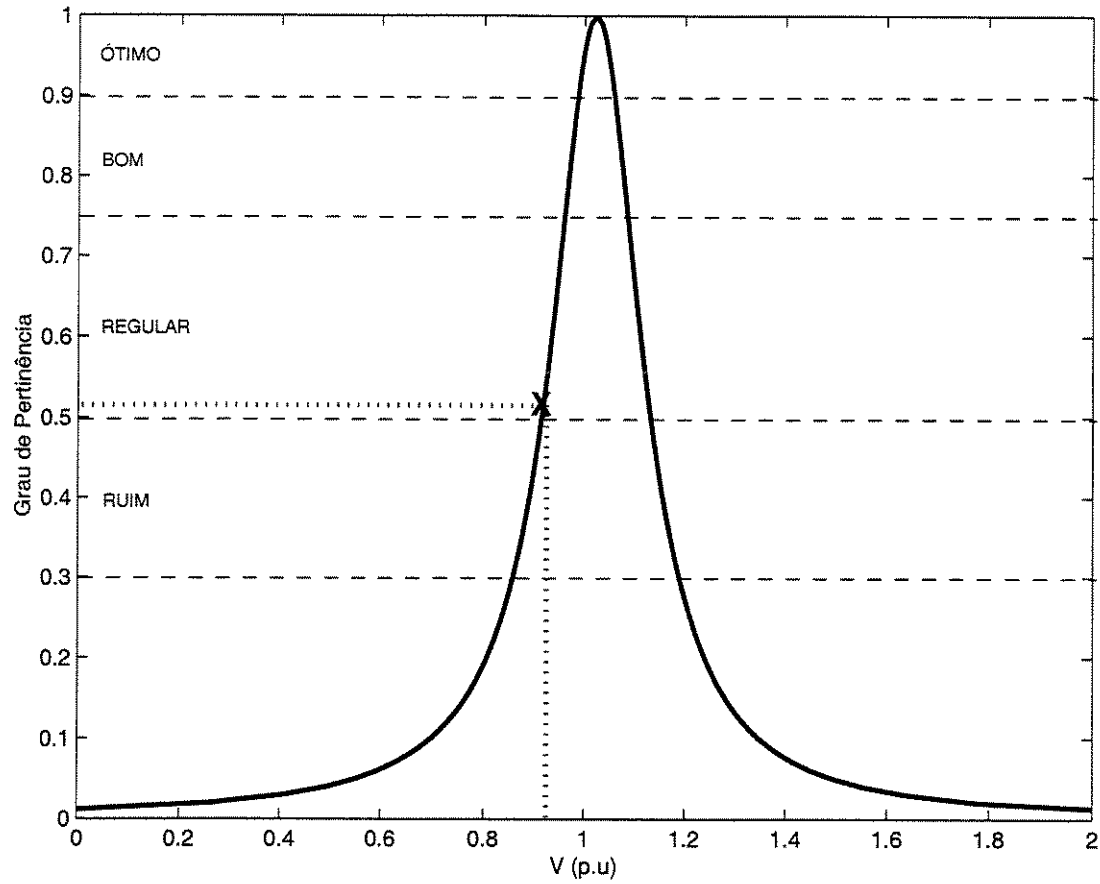


Figura 5.20: Análise da variação de tensão na barra 27

Na figura 5.21 tem-se um destaque do valor da tensão na barra 27 após a contingência, o que permite uma análise melhor do referido valor em relação ao grau de pertinência.

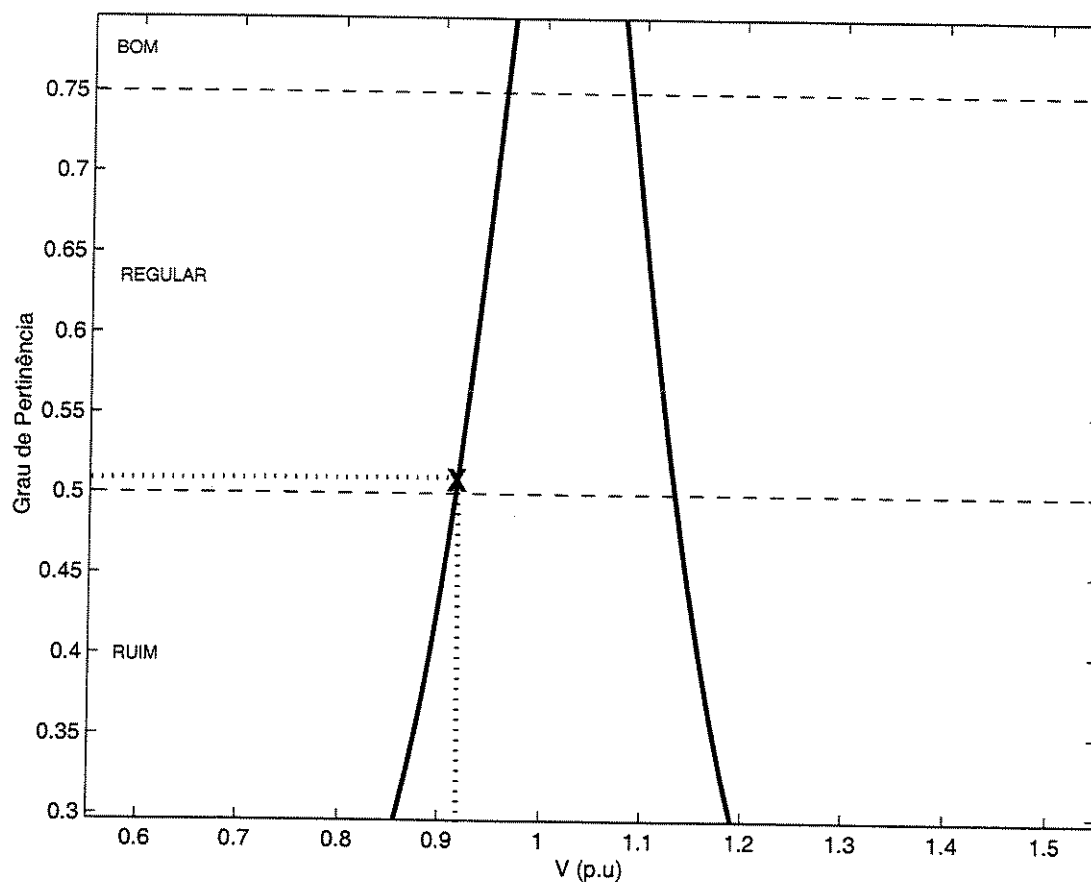


Figura 5.21: Detalhe da variação de tensão na barra 27

Após a simulação da contingência, a tensão na barra 27 apresenta um grau de pertinência em torno de 0,51, sendo considerado um resultado *regular* ou seja, linguisticamente pode-se dizer que “a tensão na barra 27 está regular”.

Agora faz-se uma análise da tensão na barra 28, a qual aumentou de 1,0071pu para 1,0113pu, representada na figura 5.22. Portanto, após a saída do ramo 28-27, a tensão na barra 28 apresenta um grau de pertinência próximo de 0,82, o que é considerado *bom* ou seja, lingüísticamente pode-se afirmar que “a tensão na barra 28 está boa”. Na figura 5.23 tem-se um destaque da tensão na barra 28 após a contingência.

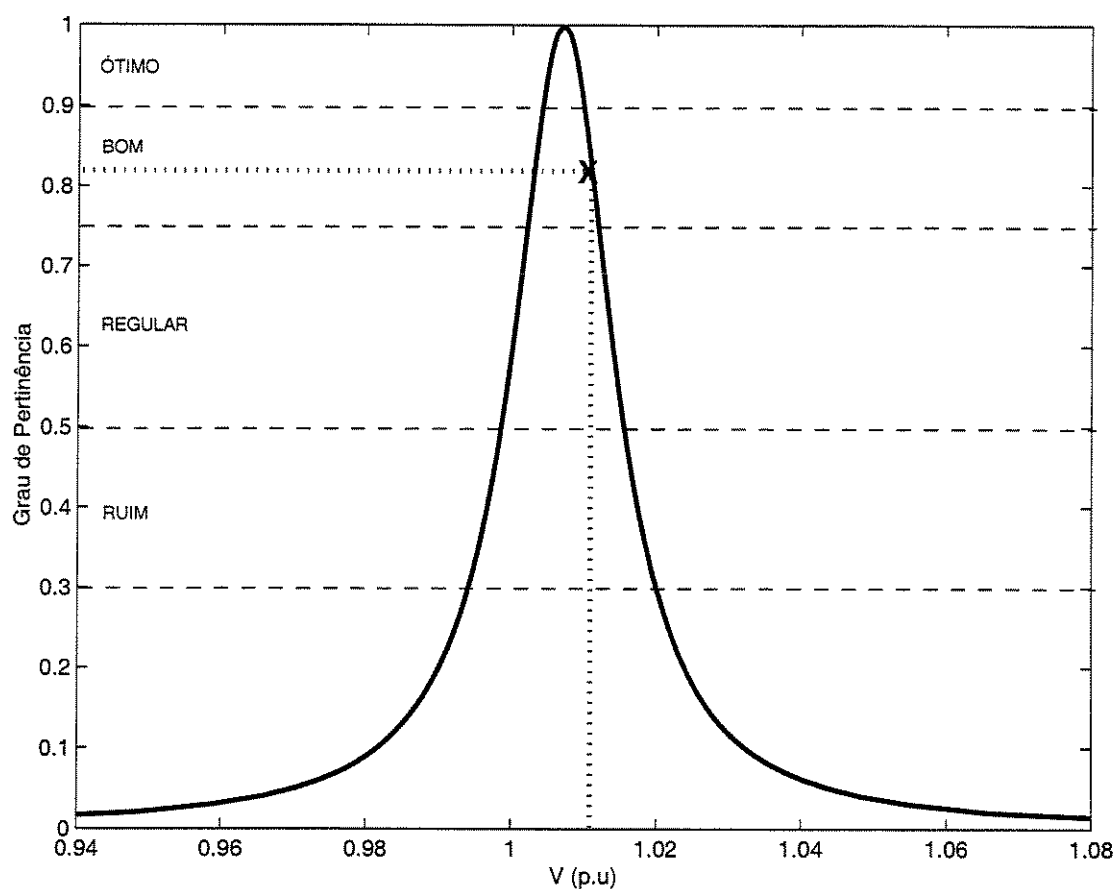


Figura 5.22: Análise da variação de tensão na barra 28

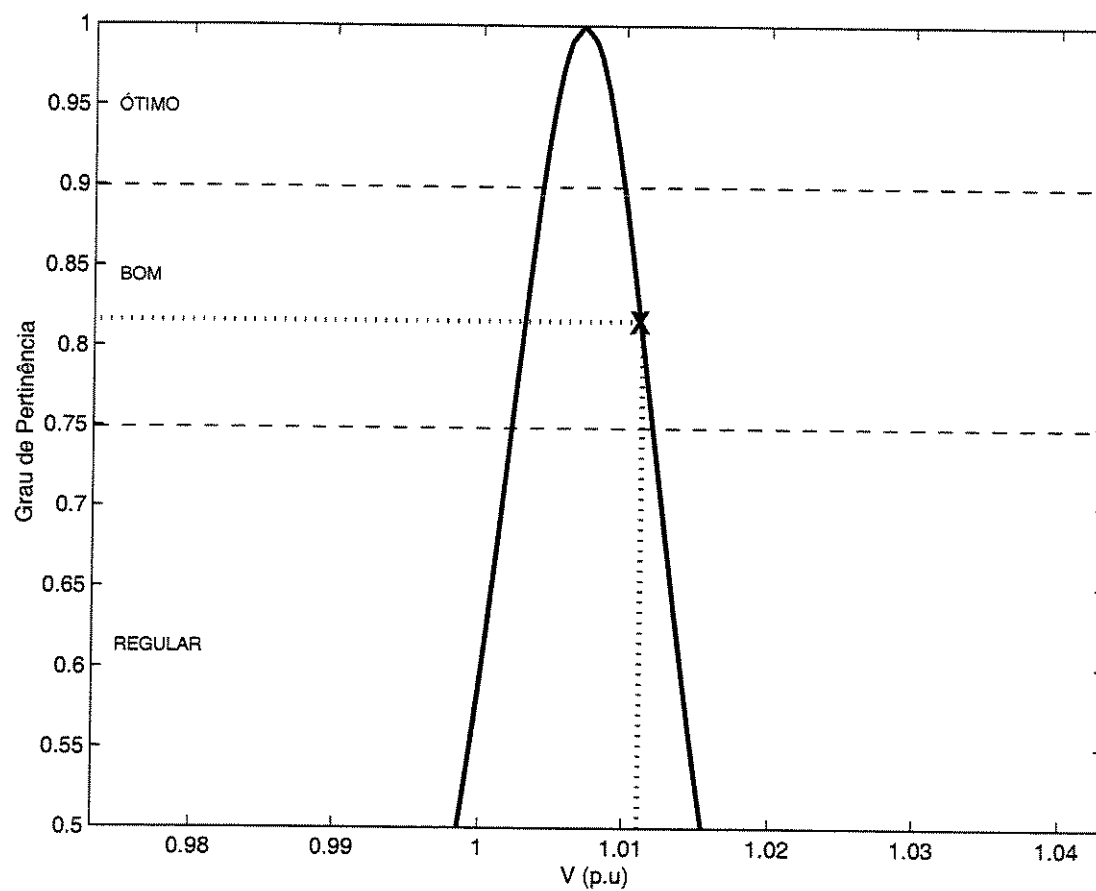


Figura 5.23: Análise da variação de tensão na barra 28

Simulou-se também uma variação de fluxo de potência ativa, fazendo com que o resultado numérico seja transformado em resultado lingüístico.

A figura 5.24 traz a distribuição de possibilidades para o fluxo de potência ativa no ramo 1-3. Neste ramo o valor de m da distribuição de possibilidades é o próprio fluxo de potência ativa no ramo: 83,0819 MW.

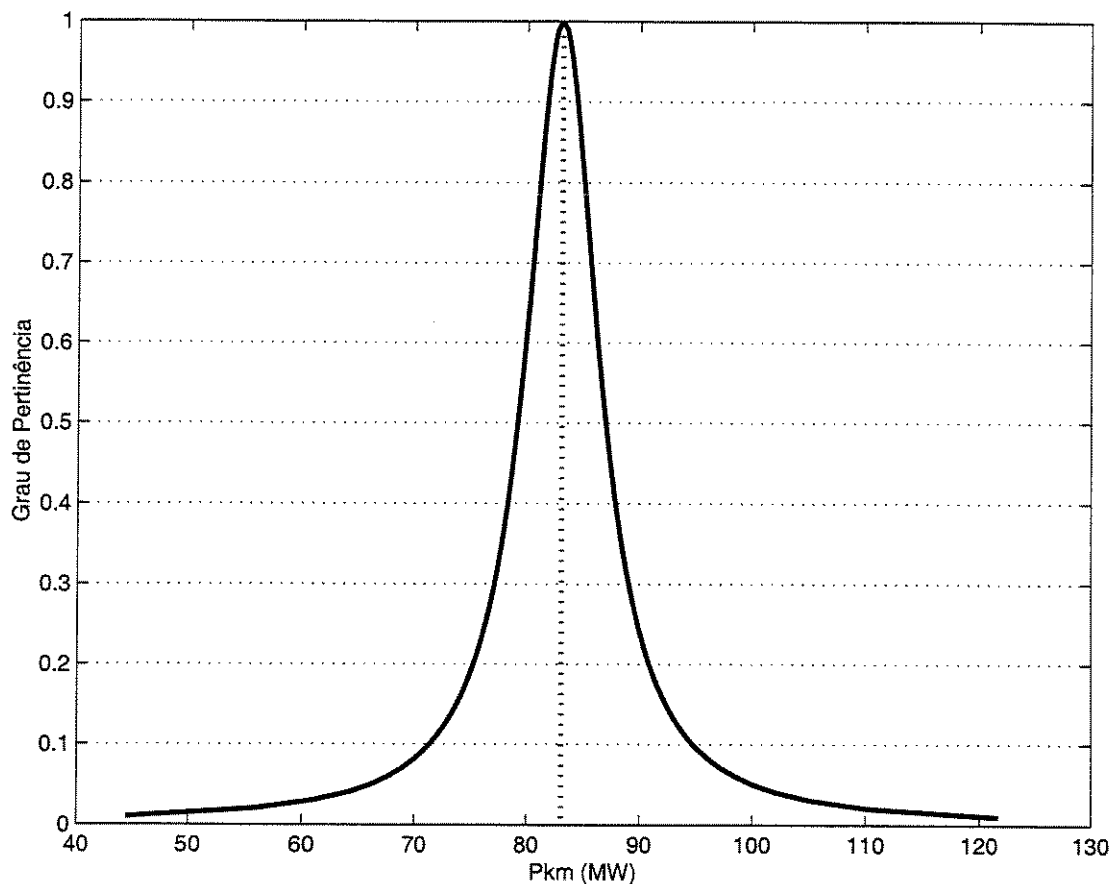


Figura 5.24: Distribuição de possibilidades para o fluxo de potência no ramo 1-3

A simulação considerou um aumento no fluxo de 83,0819 MW para 85,000 MW. A figura 5.25 traz a função sinusoidal incorporando o valor medido do fluxo de potência ativa para o ramo 1-3, podendo-se observar a faixa de variação do grau de pertinência. Na figura 5.26 tem-se um destaque do valor medido, o que permite uma melhor análise do referido valor em relação ao grau de pertinência.

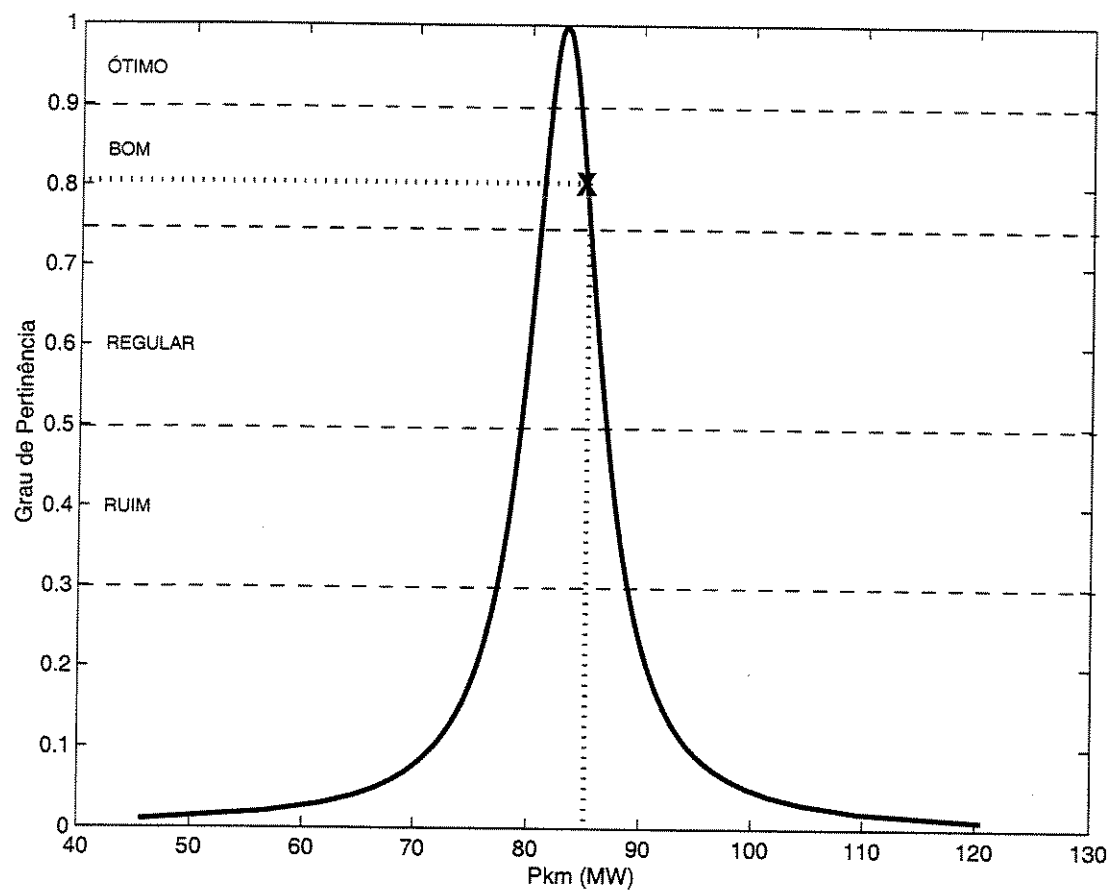


Figura 5.25: Análise do aumento do fluxo de potência no ramo 1-3

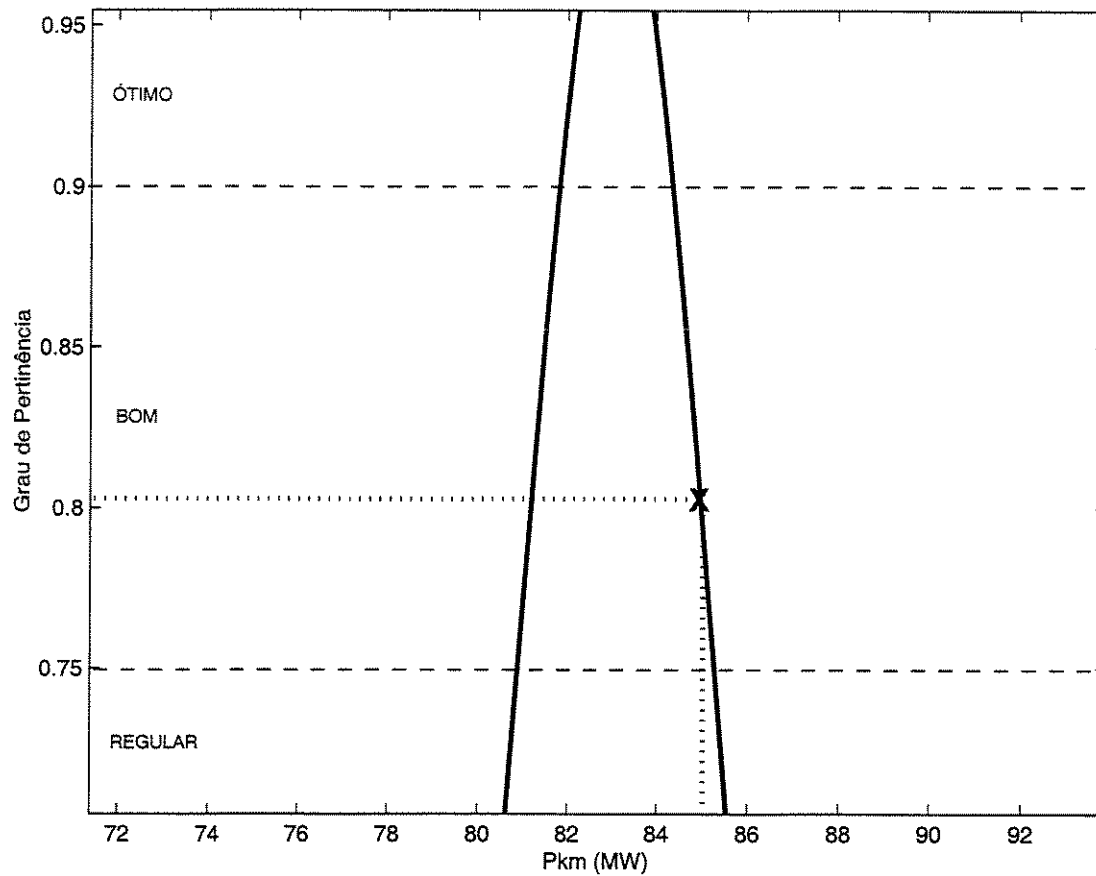


Figura 5.26: Destaque do fluxo de potência medido no ramo 1-3

Esta simulação permite concluir que embora o fluxo de potência tenha aumentado, este pode ser classificado como *bom*, ou seja, pode-se afirmar que “o fluxo de potência ativa no ramo 1-3 é bom”, pois para o valor do fluxo de potência medido (85 MW) tem-se um grau de pertinência em torno de 0,805.

Simulou-se ainda uma variação no fluxo de potência ativa no ramo 12-15 da rede em análise. A figura 5.27 traz a distribuição de possibilidades para o fluxo de potência ativa no ramo 12-15. Neste ramo o valor de m da distribuição de possibilidades é o próprio fluxo de potência ativa no ramo: 17,8402 MW.

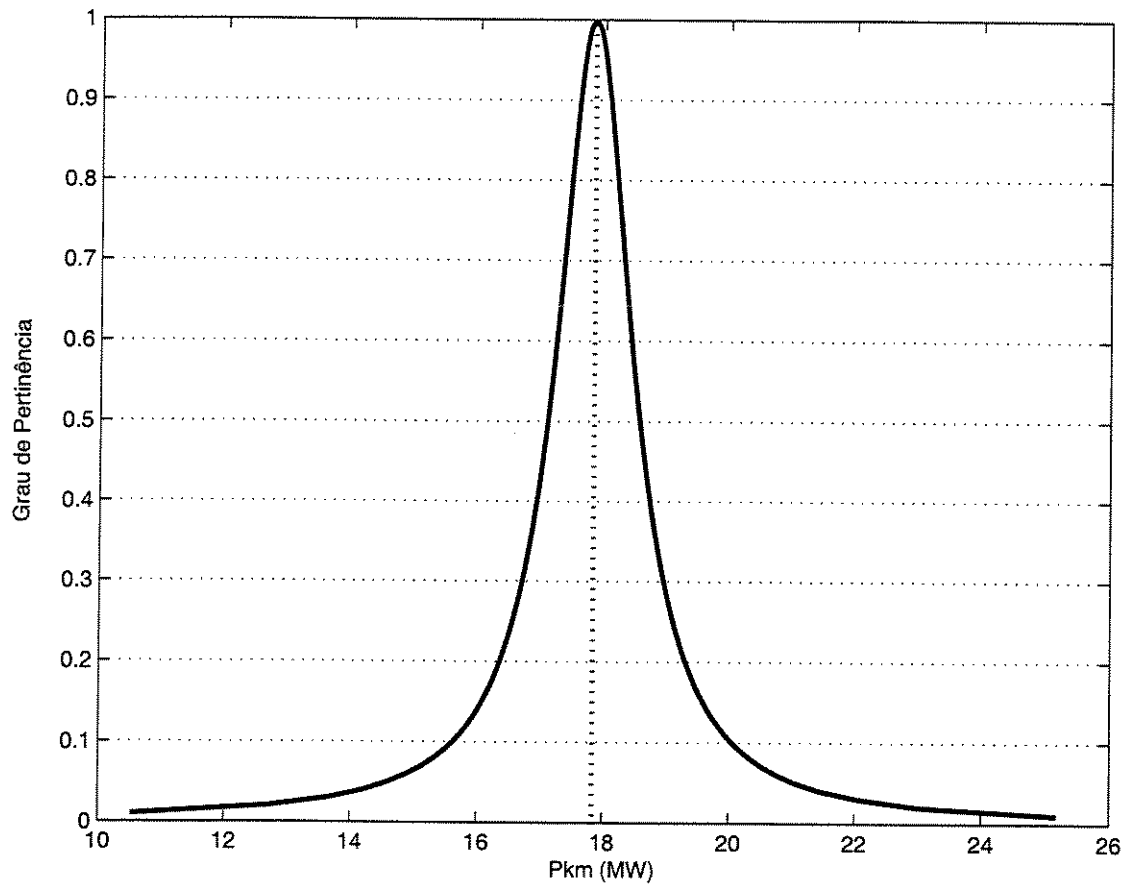


Figura 5.27: Distribuição de possibilidades para o fluxo de potência no ramo 12-15

A simulação considerou um aumento no fluxo de 17,8402 MW para 18,250 MW. A figura 5.28 traz a função sinusoidal incorporando o valor medido do fluxo de potência ativa para o ramo 12-15, podendo-se observar a faixa de variação do grau de pertinência. Na figura 5.29 tem-se um destaque do valor medido, o que permite uma melhor análise do referido valor em relação ao grau de pertinência.

Esta simulação permite concluir que embora o fluxo de potência tenha aumentado, este pode ser classificado como *bom*, ou seja, pode-se afirmar que “o fluxo de potência ativa no ramo 12-15 é bom”, pois o valor do fluxo medido (18,250 MW) apresenta um grau de pertinência em torno de 0,825, ou seja, este encontra-se no intervalo [0,75 0,9] que foi previamente determinado.

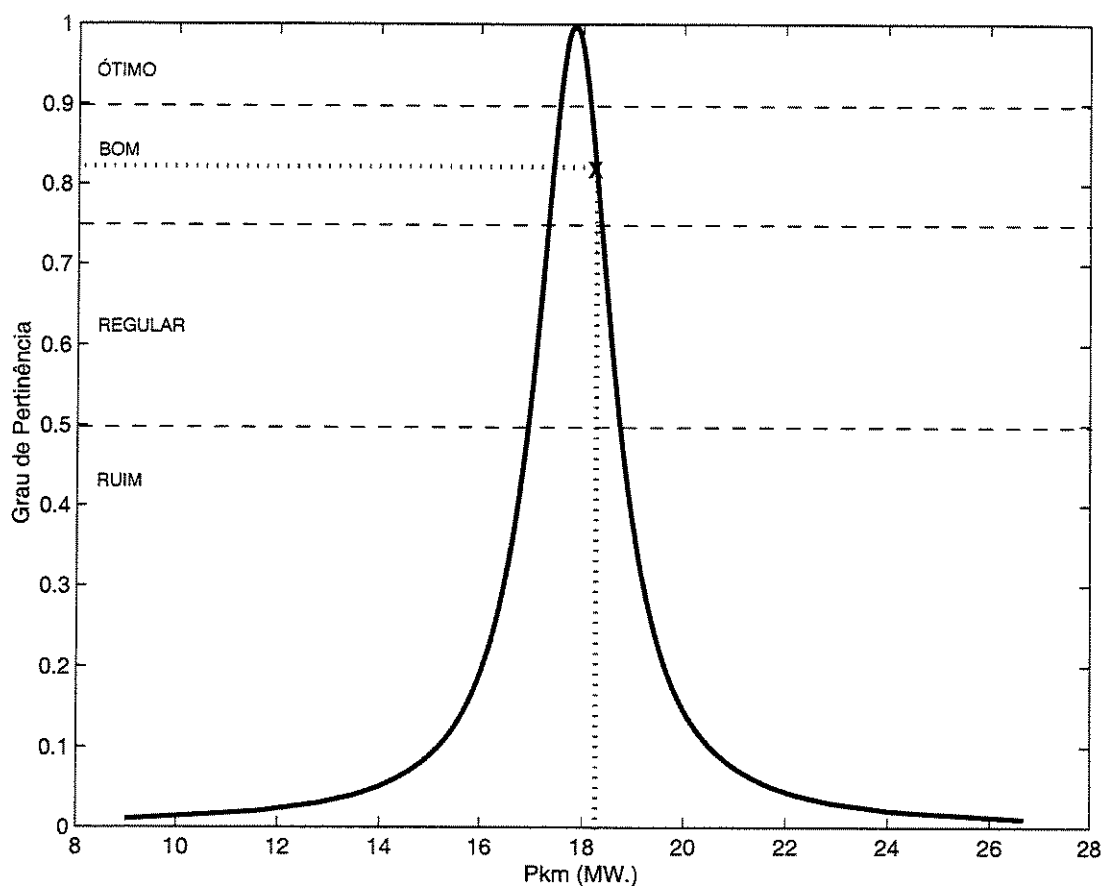


Figura 5.28: Análise do aumento do fluxo de potência no ramo 12-15

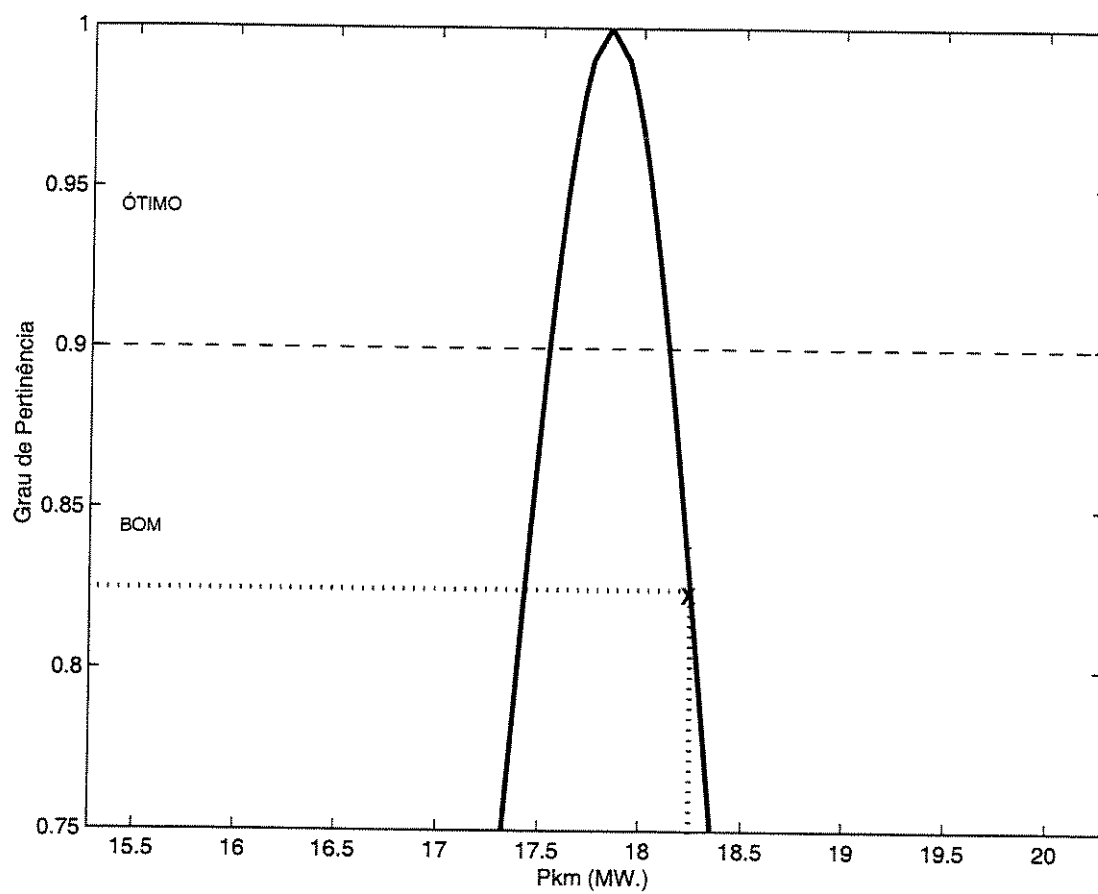


Figura 5.29: Destaque do fluxo de potência medido no ramo 12-15

Ainda em consideração ao fluxo de potência ativa, exemplifica-se mais uma análise dos termos lingüísticos. A figura 5.30 traz a distribuição de possibilidades para o fluxo de potência ativa no ramo 28-27. Neste ramo o valor de m da distribuição de possibilidades é o próprio fluxo de potência ativa no ramo: 18,0955 MW.

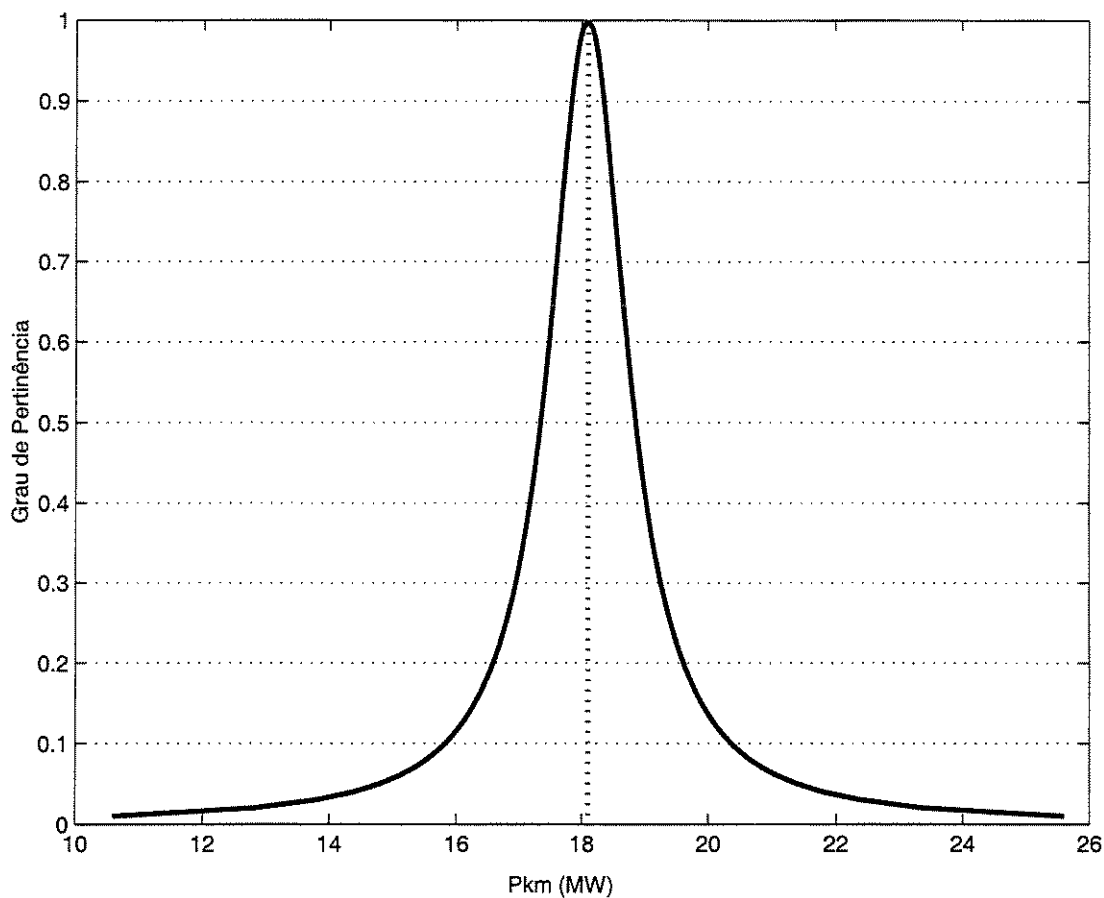


Figura 5.30: Distribuição de possibilidades para o fluxo de potência no ramo 28-27

A simulação considerou uma queda no fluxo de potência ativa de 18,0955 MW para 17,042 MW. A figura 5.31 traz a função sinusoidal incorporando o valor medido do fluxo de potência ativa para o ramo 28-27, podendo-se observar a faixa de variação do grau de pertinência.

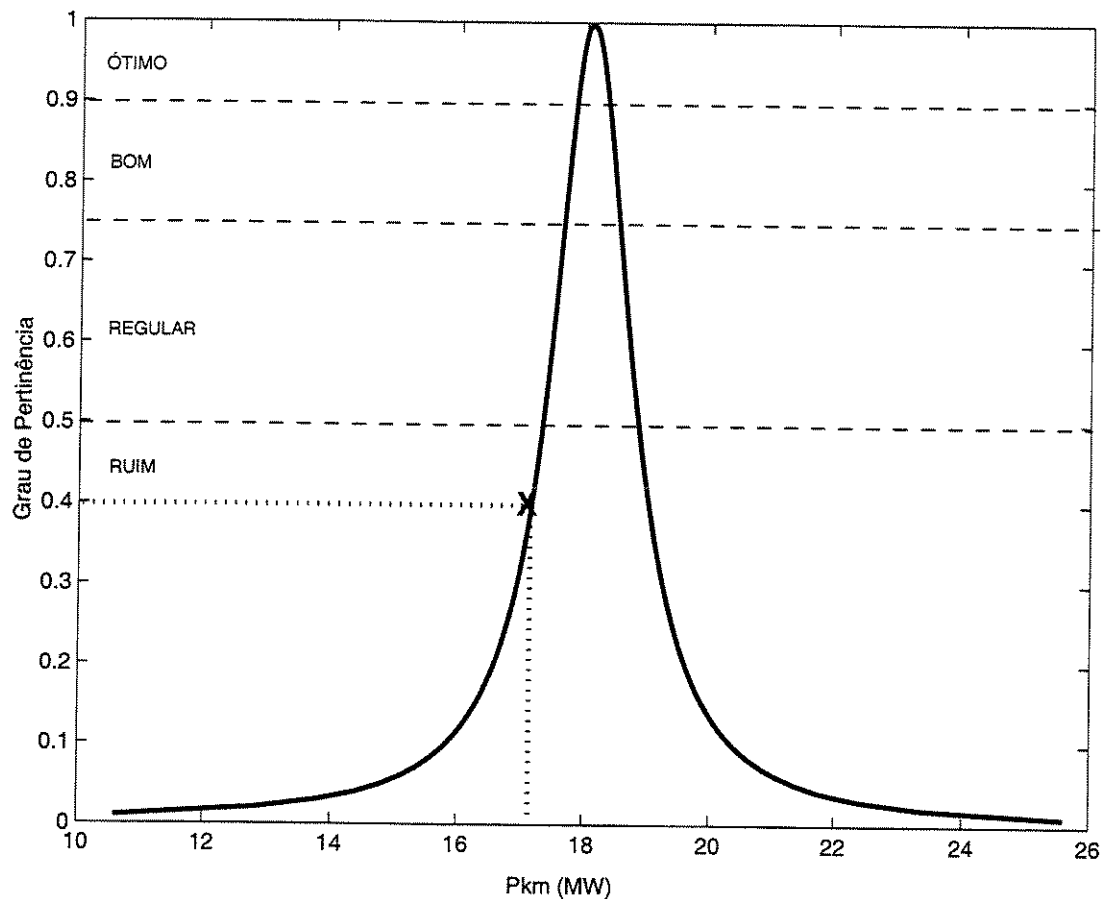


Figura 5.31: Análise da queda do fluxo de potência no ramo 27-28

Esta simulação permite concluir que embora o fluxo de potência tenha diminuído pouco, lingüisticamente é considerado *ruim*, ou seja, pode-se afirmar que “o fluxo de potência ativa no ramo 28-27 é ruim”, pois o valor do fluxo (17,042 MW) apresenta um grau de pertinência em torno de 0,40 e portanto este encontra-se no intervalo $[0,3 \quad 0,50]$ que foi previamente determinado.

5.2.3 Resultados para IEEE57

O sistema IEEE57 é um sistema de testes com 57 barras, sendo 6 barras de tensão controlada e uma referência. Possui 80 ramos, sendo um sistema mais denso do que o IEEE30. Possui também dois transformadores em paralelo.

Para este sistema foram simuladas contingências em alguns ramos (tabela 5.21), estando estes entre os mais carregados.

Tabela 5.21: Fluxos de potência ativa (MW)

Ramo	P_{km}	
	m	α
14-15	-69,0790	4,9953
7-29	60,2706	1,4187
44-45	-36,7604	2,8144
14-46	48,2098	2,3752

Para a análise deste sistema simulou-se a saída de cada ramo individualmente. A simulação da saída do ramo 14-15 apresentou as seguintes variações nas magnitudes de tensão nas barras terminais: a tensão na barra 14 variou de 0,9694pu para 0,9532pu e na barra 15 a variação foi de 0,9875pu para 0,9952pu.

As figuras 5.32 e 5.33 mostram as magnitudes de tensão nas barras 14 e 15 respectivamente, antes da saída do ramo.

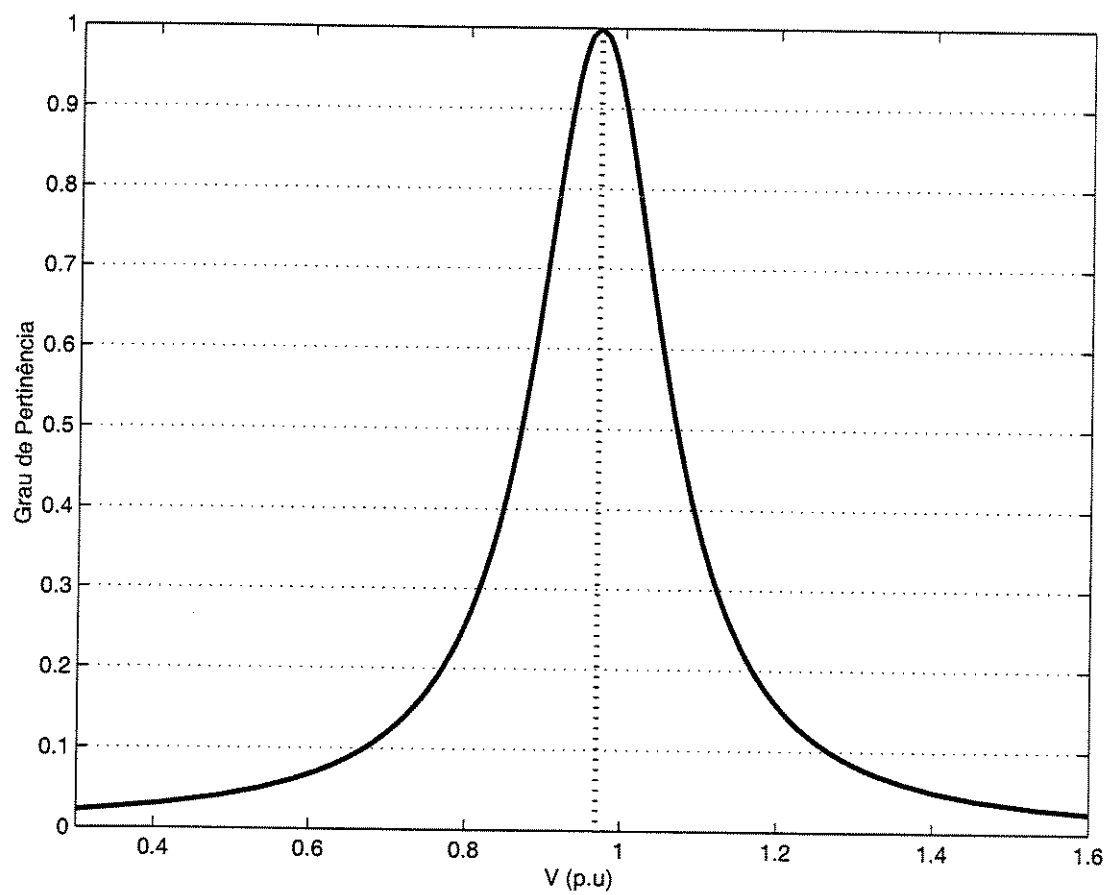


Figura 5.32: Distribuição de possibilidades para a tensão na barra 14

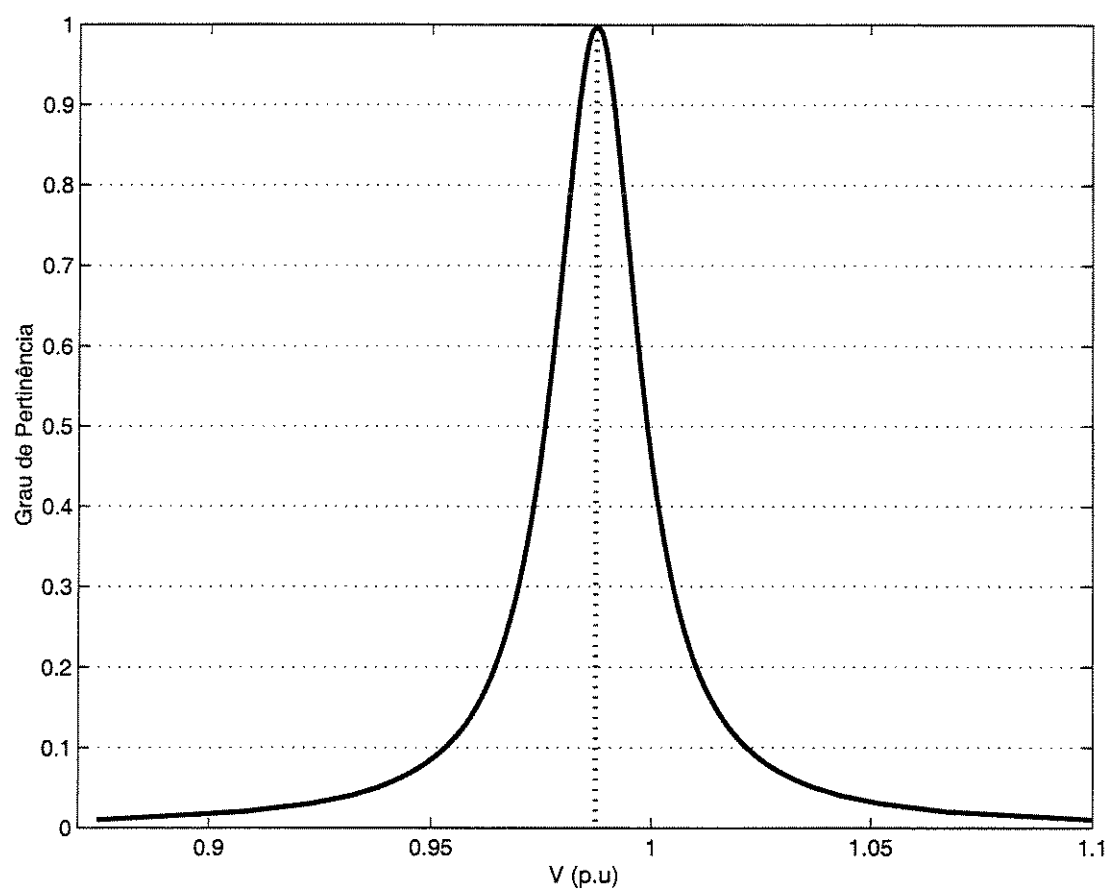


Figura 5.33: Distribuição de possibilidades para a tensão na barra 15

A queda de tensão ocorrida na barra 14 é apresentada na figura 5.34, para que se possa fazer uma análise lingüística.

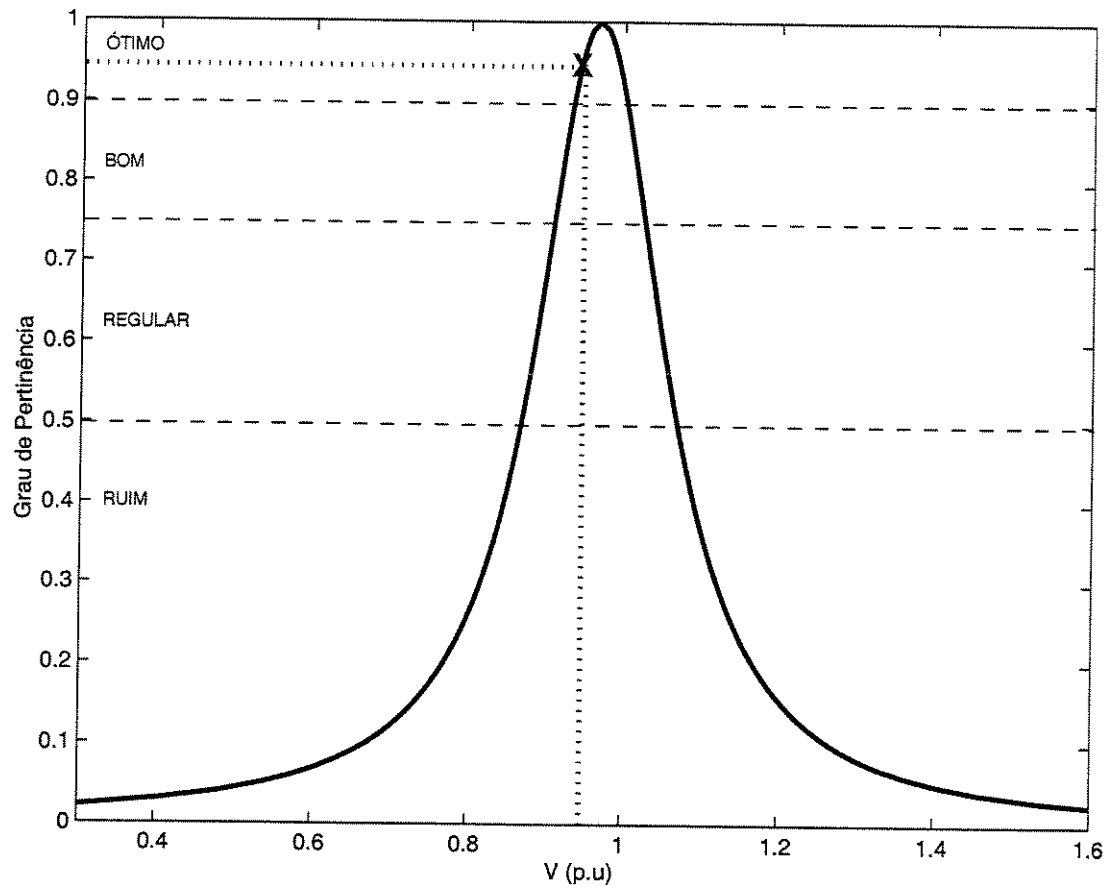


Figura 5.34: Análise da variação de tensão na barra 14

Na figura 5.35 tem-se um destaque do valor da tensão na barra 14 após a contingência, o que permite uma análise melhor do referido valor em relação ao grau de pertinência.

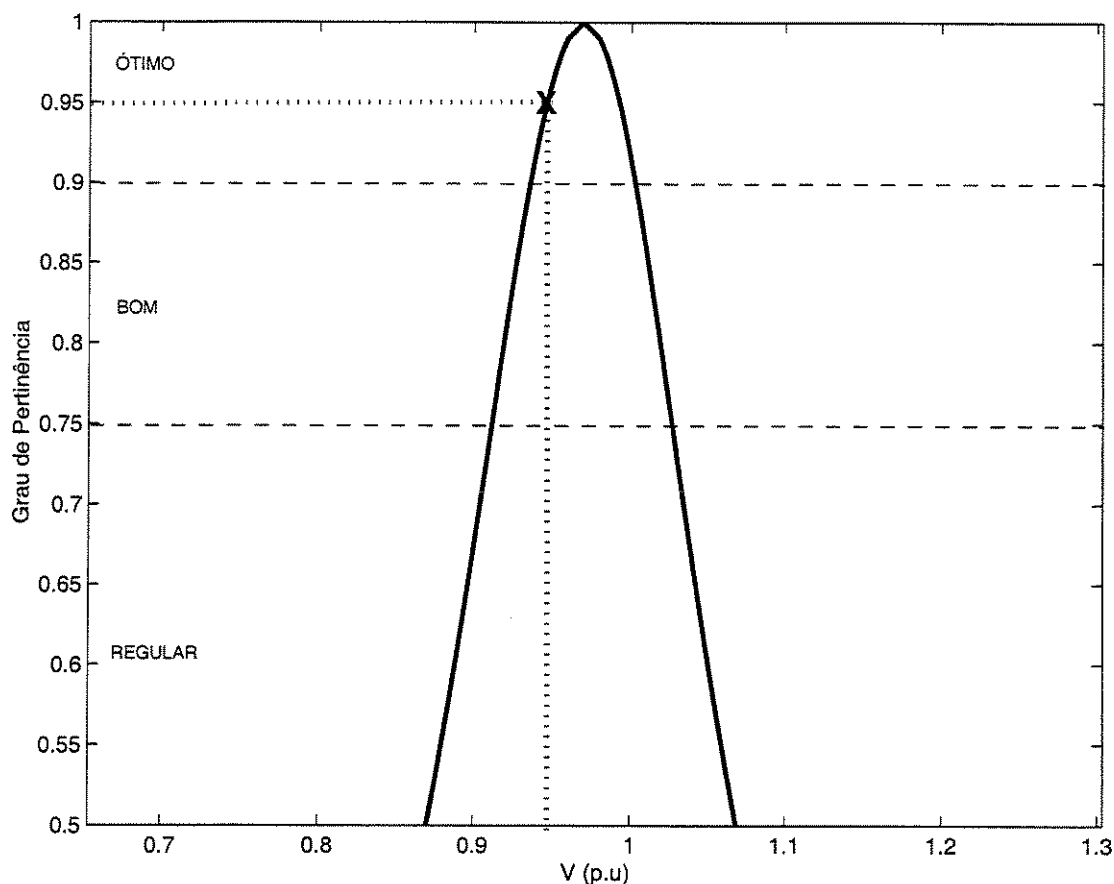


Figura 5.35: Detalhe da variação de tensão na barra 14

Após a simulação da contingência, a tensão na barra 14 apresenta um grau de pertinência em torno de 0,95, sendo considerado um resultado *ótimo* ou seja, linguisticamente pode-se dizer que “a tensão na barra 14 está ótima”.

Agora faz-se uma análise da tensão na barra 15, a qual aumentou de 0,9875pu para 0,9924pu, representada na figura 5.36. Após a saída do ramo 14-15, a tensão na barra 14 apresenta um grau de pertinência próximo de 0,88, o que é considerado *bom* ou seja, linguisticamente pode-se afirmar que “a tensão na barra 15 está boa”.

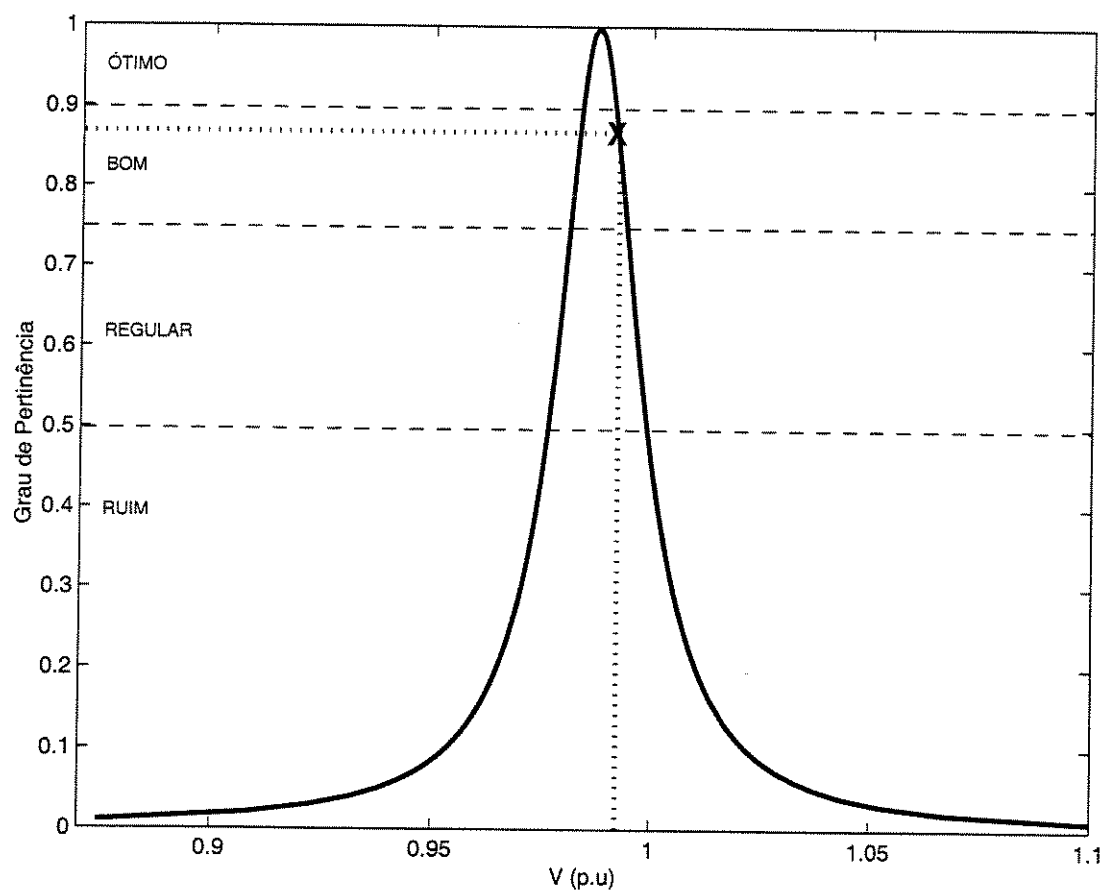


Figura 5.36: Análise da variação de tensão na barra 15

Simula-se agora a saída do ramo 7-29. Para esta contingência, observou-se a seguinte variação nas magnitudes de tensão das barras terminais: na barra 7 a tensão aumentou de 0,9840pu para 0,9952pu e na barra 29 houve uma diminuição de 1,0098pu para 0,700pu.

As figuras 5.37 e 5.38 mostram as magnitudes das tensões nas barras 7 e 29, respectivamente antes da saída do ramo.

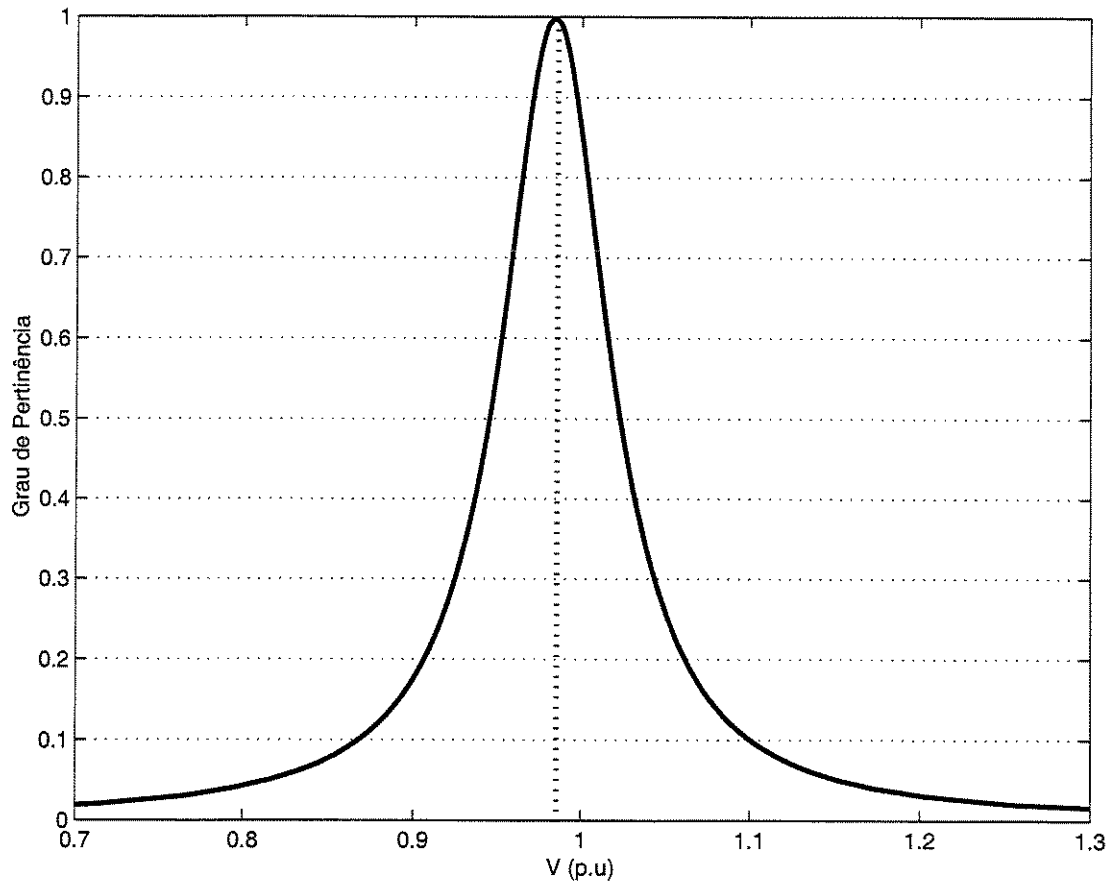


Figura 5.37: Distribuição de possibilidades para a tensão na barra 7

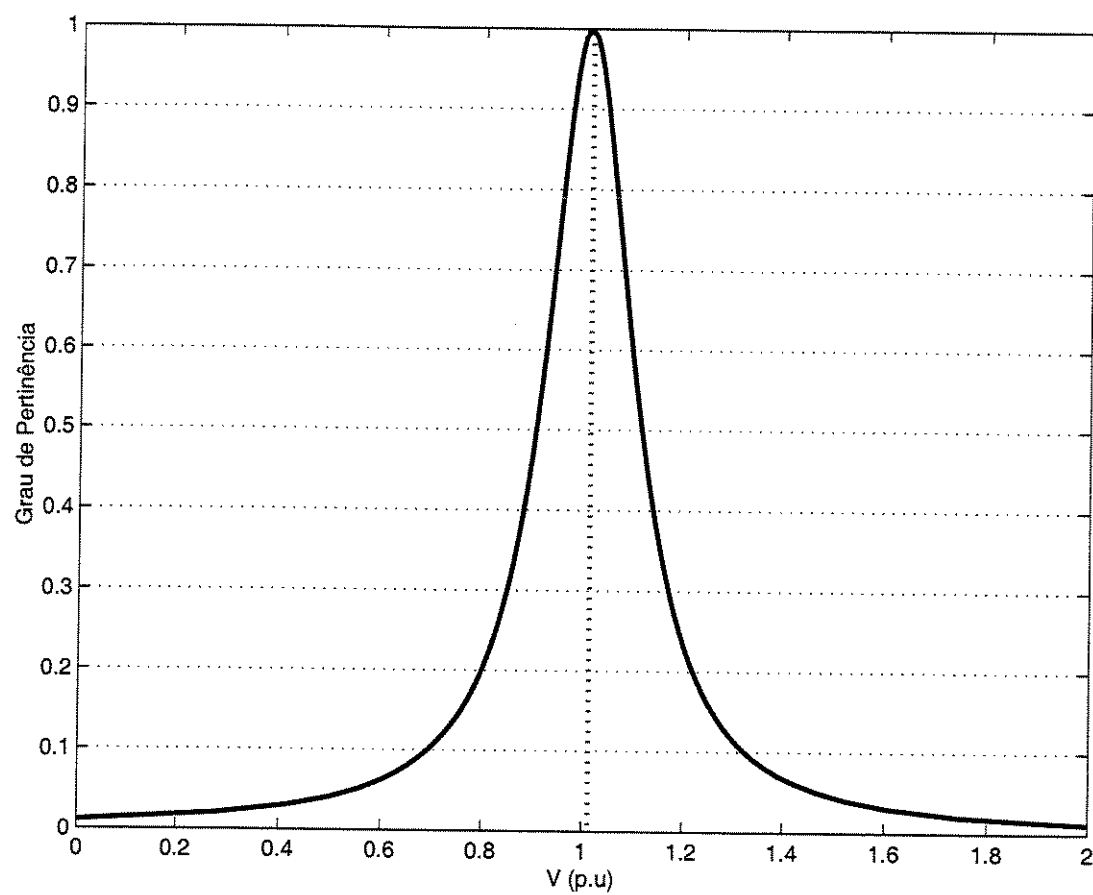


Figura 5.38: Distribuição de possibilidades para a tensão na barra 29

O aumento na tensão ocorrido na barra 7 é apresentado na figura 5.39, para que se possa fazer uma análise lingüística.

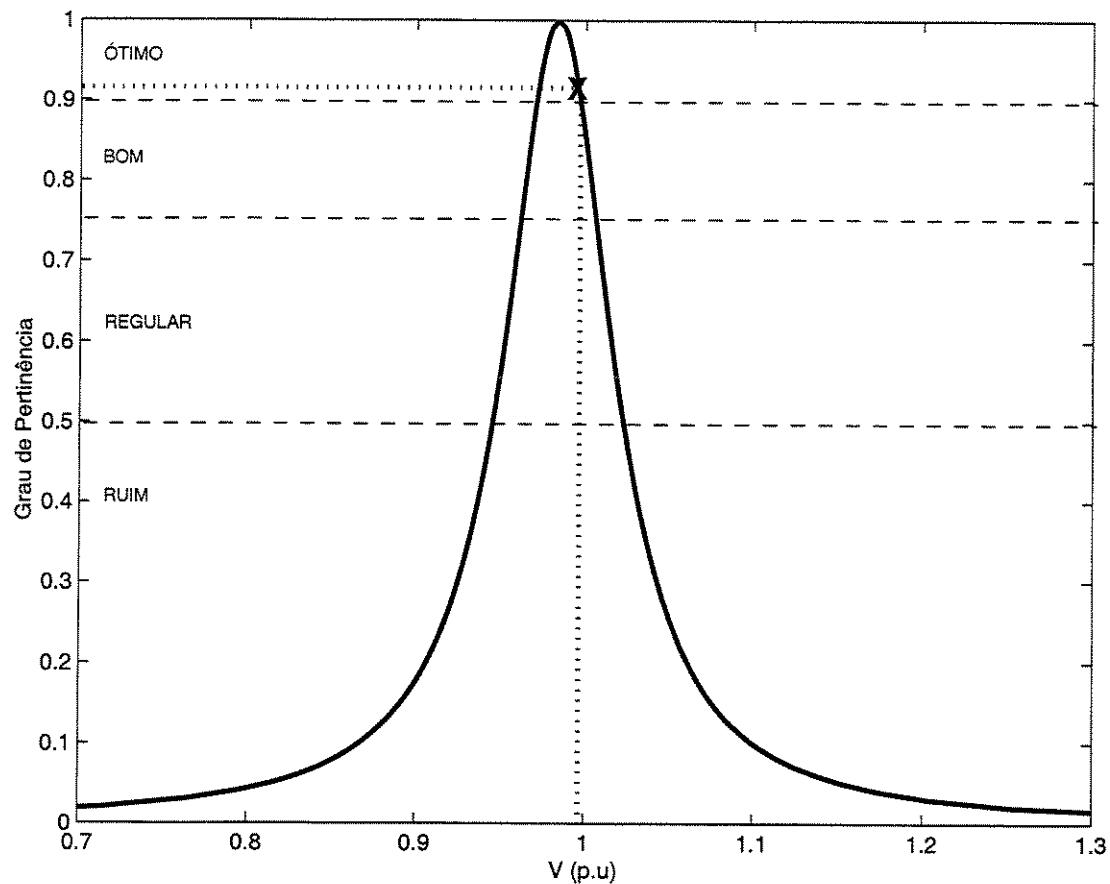


Figura 5.39: Análise da variação de tensão na barra 7

Na figura 5.40 tem-se um destaque do valor da tensão na barra 7 após a contingência, o que permite uma análise melhor do referido valor em relação ao grau de pertinência.

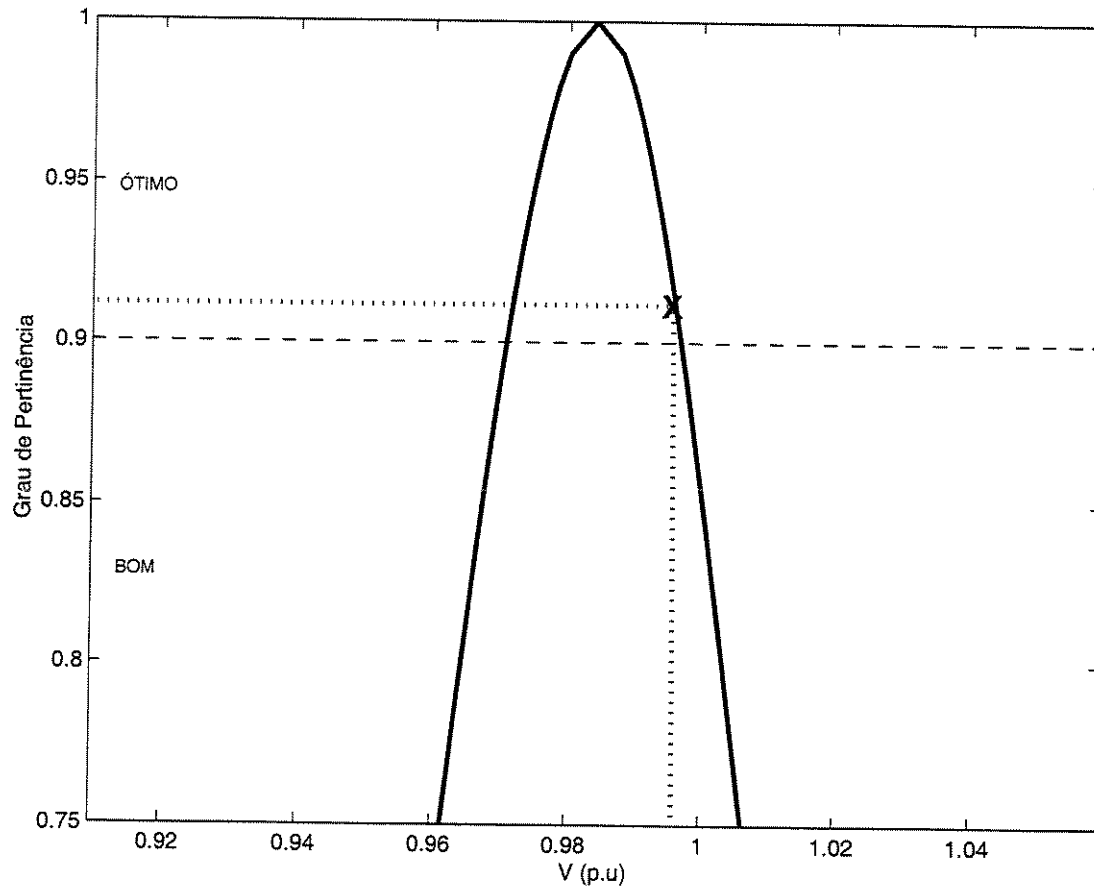


Figura 5.40: Detalhe da variação de tensão na barra 7

Após a simulação da contingência, a tensão na barra 7 apresenta um grau de pertinência em torno de 0,91, sendo considerado um resultado *ótimo* ou seja, linguisticamente pode-se dizer que “a tensão na barra 7 está ótima”.

Agora faz-se uma análise da tensão na barra 29, a qual diminuiu de 1,0098pu para 0,700pu, representada na figura 5.41. Após a saída do ramo 7-29, a tensão na barra 29 apresenta um grau de pertinência próximo de 0,18, o que é considerado *bom* ou seja, linguisticamente pode-se afirmar que “a tensão na barra 29 está ruim”.

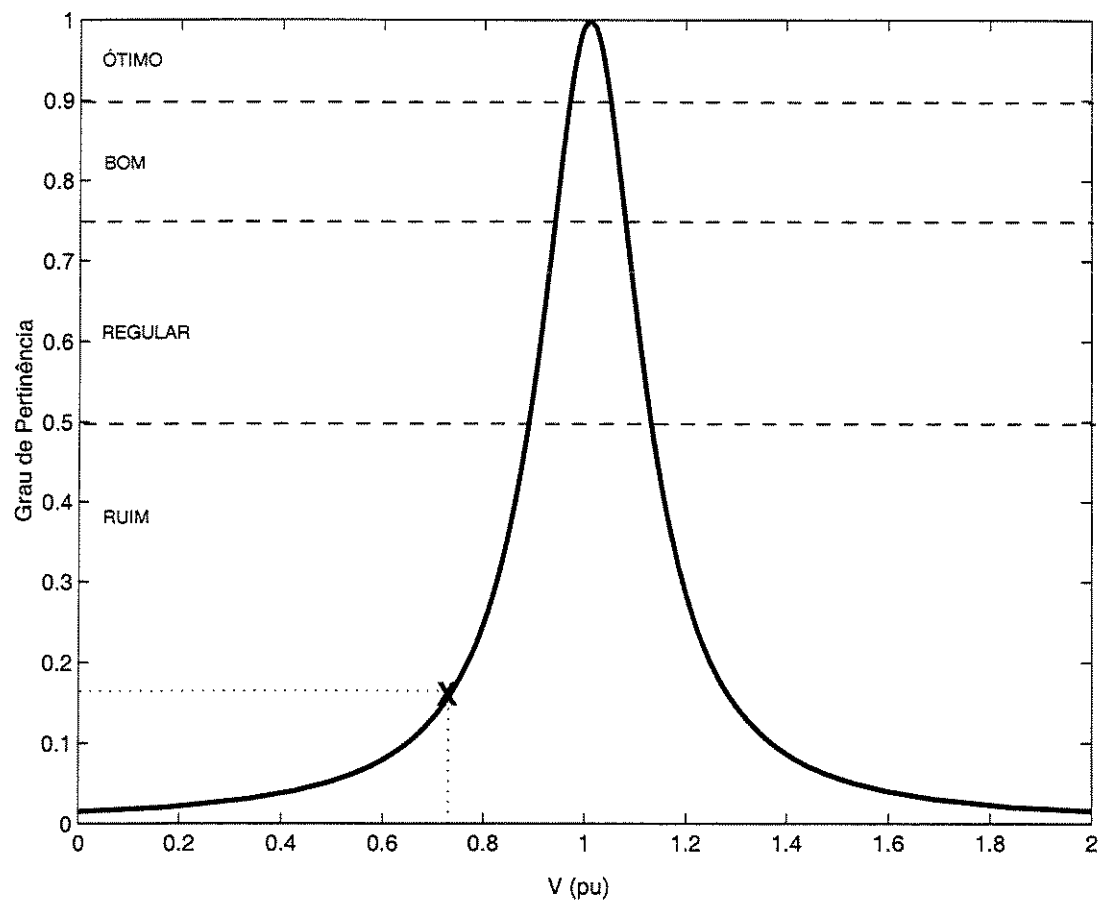


Figura 5.41: Análise da variação de tensão na barra 29

Antes de simular a contingência no ramo 44-45, as magnitudes das tensões nestas barras eram 1,0142 pu (figura 5.42) e 1,0346 pu (figura 5.43), respectivamente. As figuras 5.42 e 5.43 representam as distribuições de possibilidades para estas tensões.

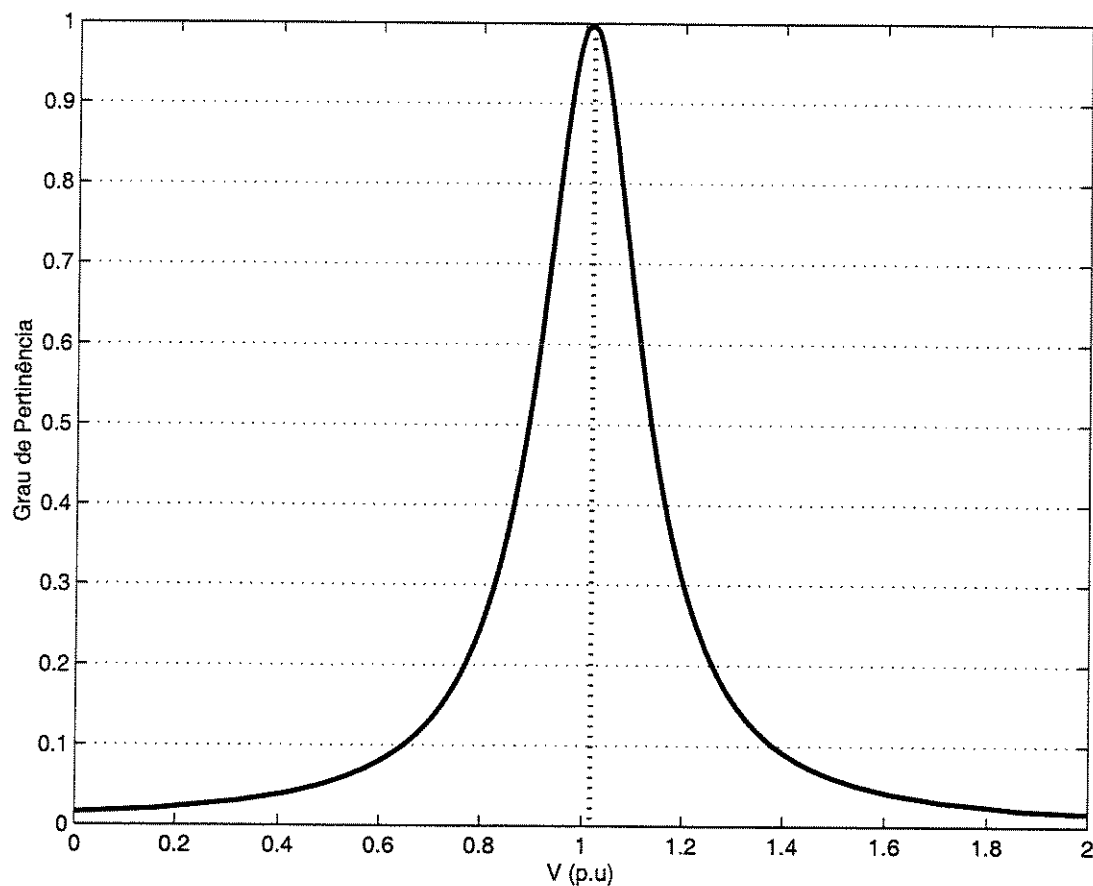


Figura 5.42: Magnitude de tensão na barra 44

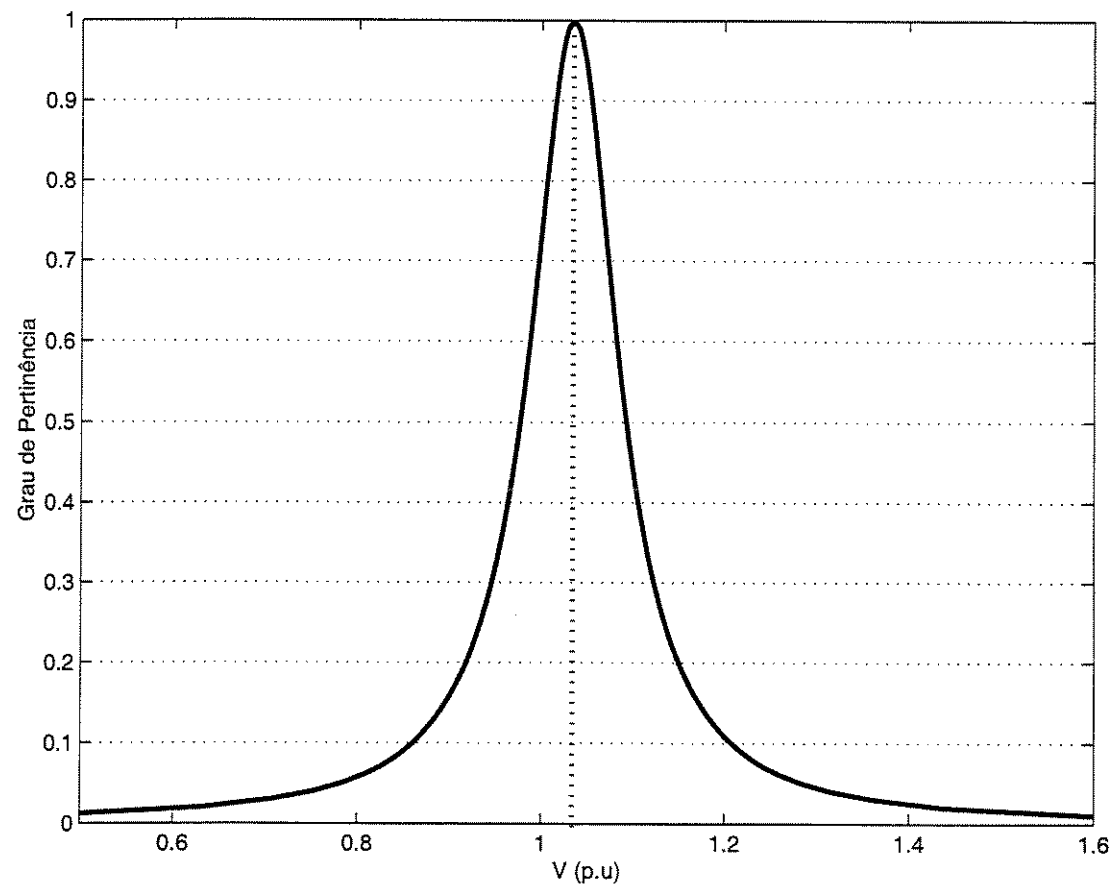


Figura 5.43: Magnitude de tensão na barra 45

Após a saída do ramo 44-45, a magnitude da tensão na barra 44 diminuiu de 1,0142 pu para 0,9907 pu, representada na figura 5.44, onde é possível observar que para esta tensão de 0,9907 pu o grau de pertinência encontra-se em torno de 0,6.

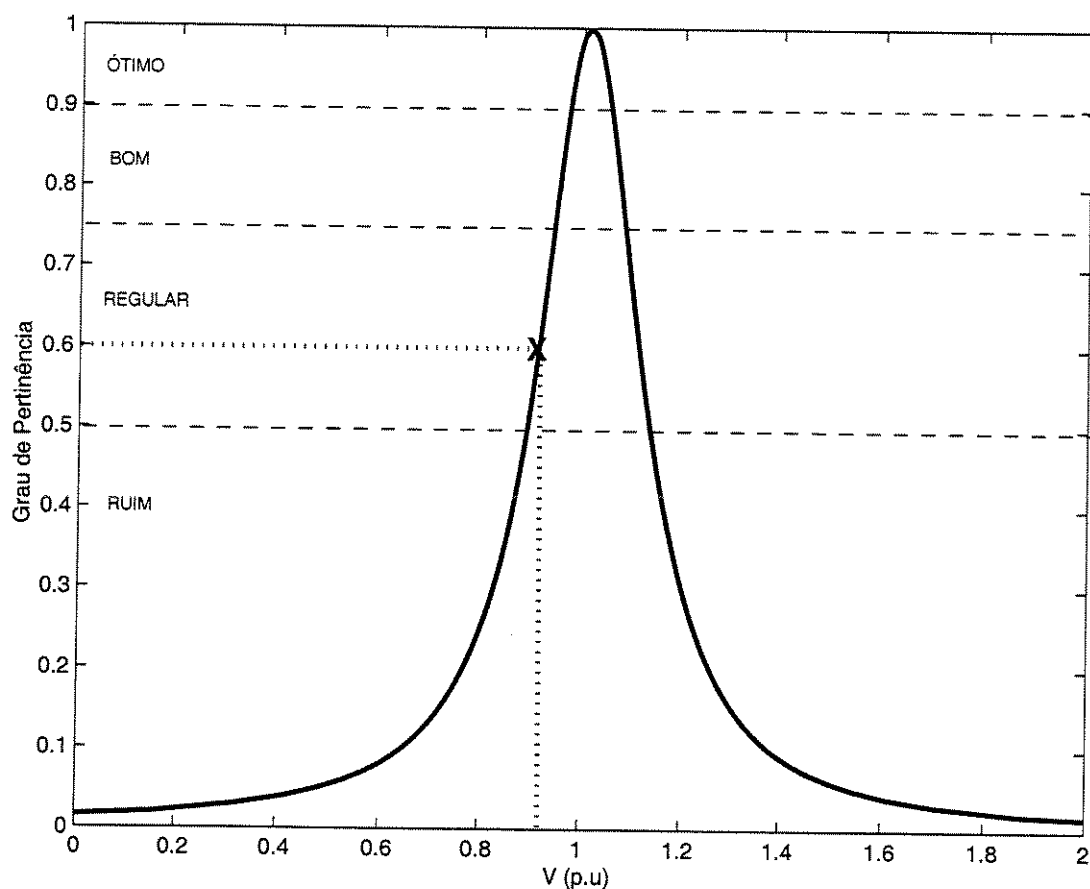


Figura 5.44: Análise da variação de tensão na barra 44

A figura 5.45 mostra em destaque esta variação da magnitude de tensão, possibilitando uma análise mais detalhada. Tendo como referência a faixa de variação para o grau de pertinência estabelecida no capítulo 4, pode-se dizer que a tensão na barra 44, após a saída do ramo 44-45, é *regular*, pois o grau de pertinência de 0,6 para a tensão de 0,9907 pu encontra-se dentro da faixa de variação $[0,5 \quad 0,75]$. Lingüísticamente, pode-se afirmar que “a tensão na barra 44 está regular”.

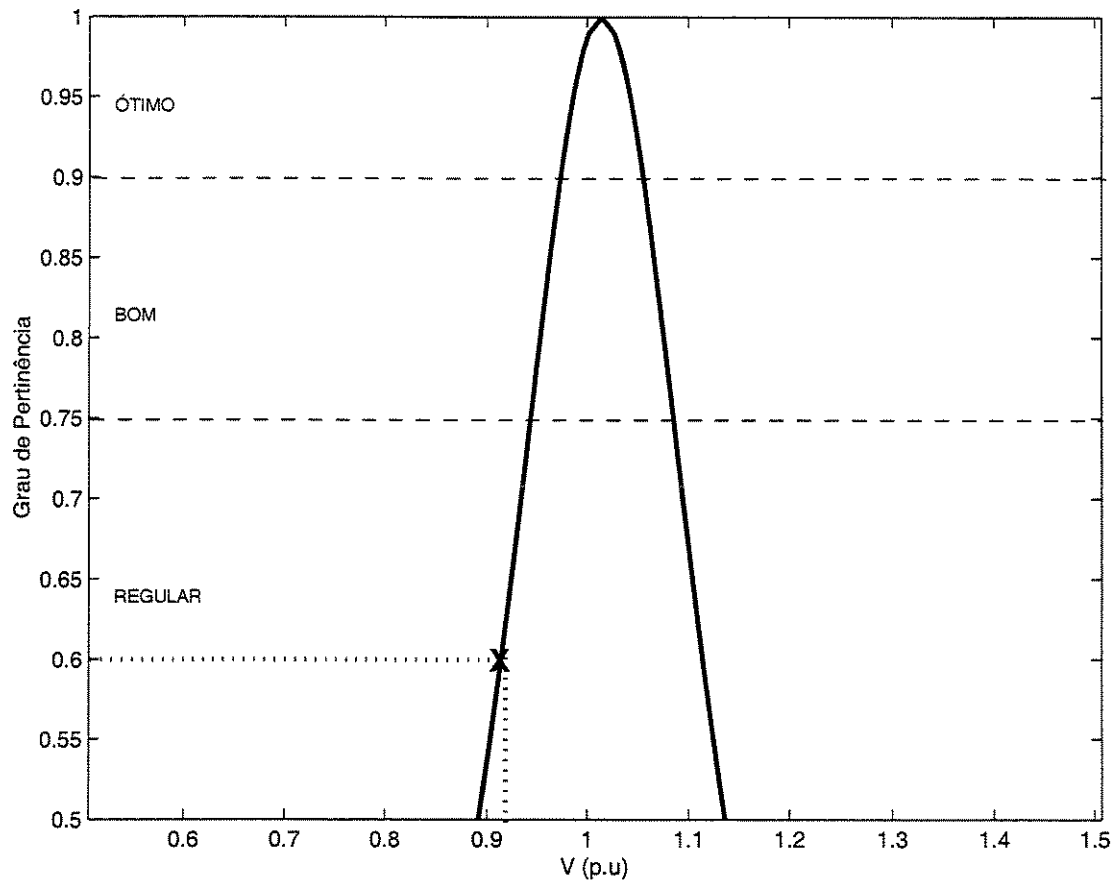


Figura 5.45: Destaque da variação de tensão na barra 44

Com a saída do ramo 44-45, a tensão na barra 45 sofreu uma variação insignificante, de 1,0346 pu para 1,0348 pu e portanto a tensão na barra 45 continua *ótima*, pois o grau de pertinência encontra-se muito próximo de 1.

Outra simulação de contingência foi feita com o ramo 14-46, sendo que antes da saída do ramo, as magnitudes das tensões nas barras terminais eram 0,9694pu e 0,9809pu, respectivamente. As figuras 5.46 e 5.47 apresentam as distribuições de possibilidades para as magnitudes das tensões nas respectivas barras 14 e 46.

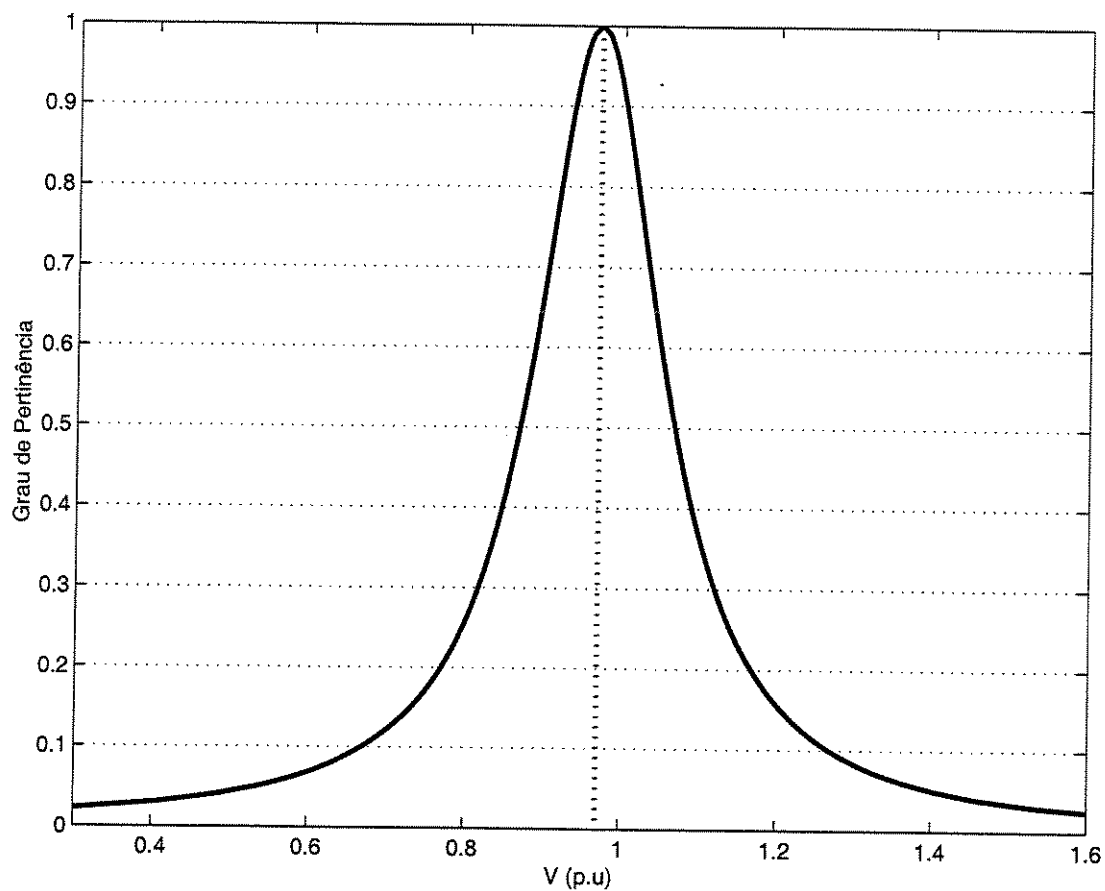


Figura 5.46: Distribuição de possibilidades para a tensão na barra 14

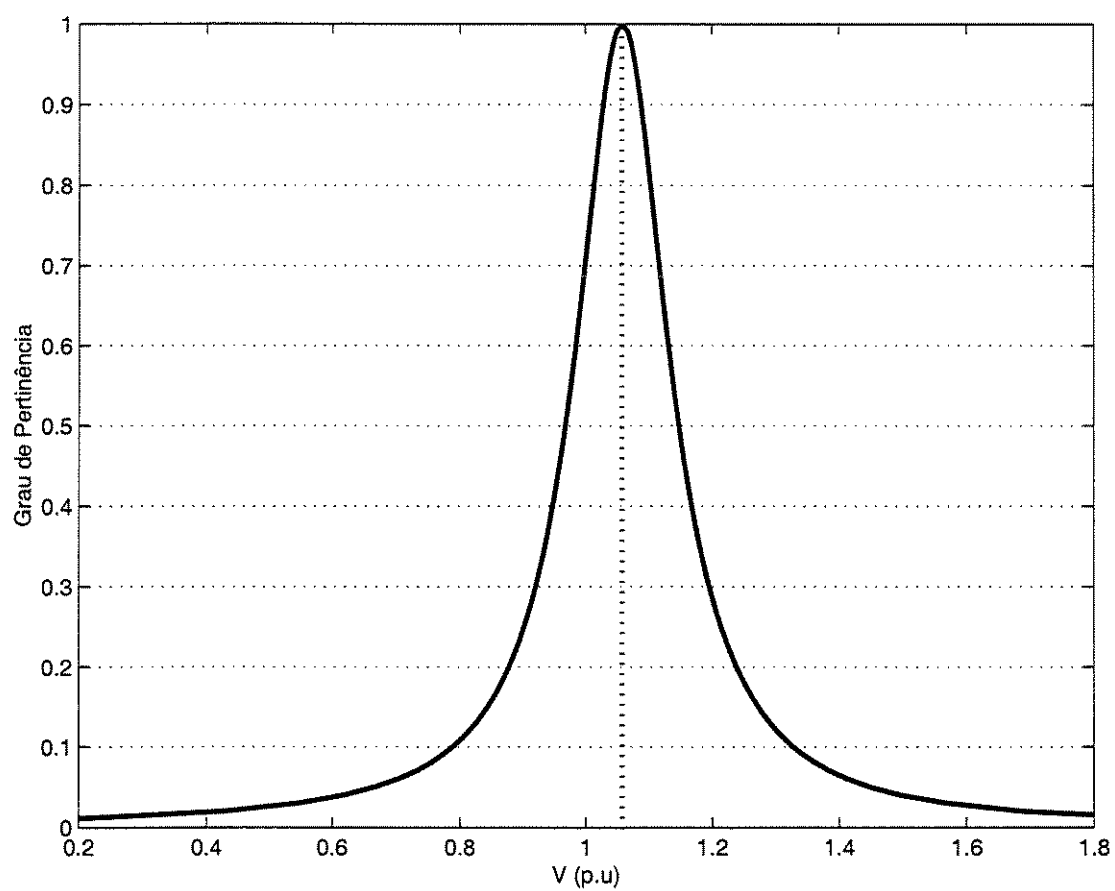


Figura 5.47: Distribuição de possibilidades para a tensão na barra 46

A saída do ramo 14-46 provocou alterações nas magnitudes das tensões destas barras. Para a barra 14, a contingência no ramo 14-46 variou a tensão para 0,9809 pu. Esta variação é observada na figura 5.48, sendo que esta magnitude de tensão apresenta um grau de pertinência em torno de 0,96.

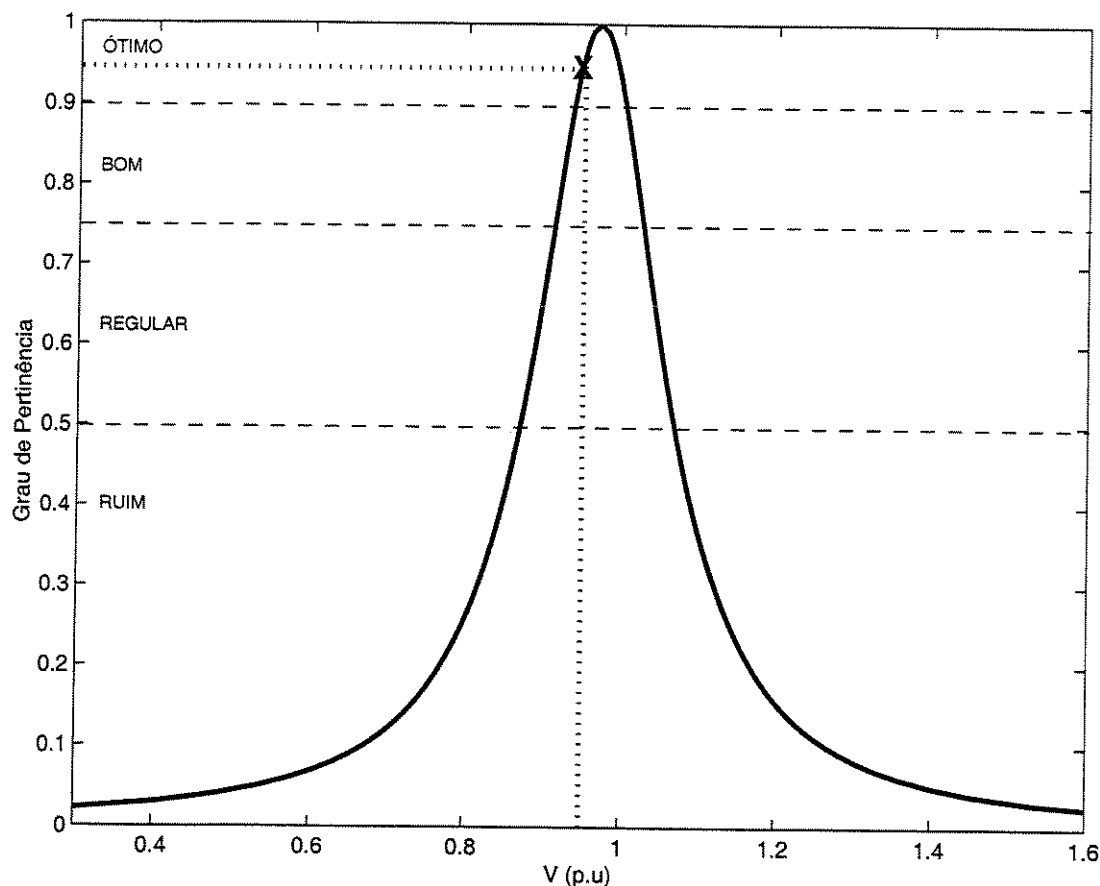


Figura 5.48: Análise da variação de tensão na barra 14

Para uma análise melhor, a figura 5.49 traz em destaque a variação da tensão na barra 14, provocada pela saída do ramo 14-46. Para o grau de pertinência de 0,96 pode-se classificar a variação de tensão como *ótima* ou seja, lingüísticamente pode-se afirmar que “a tensão na barra 14 está ótima”.

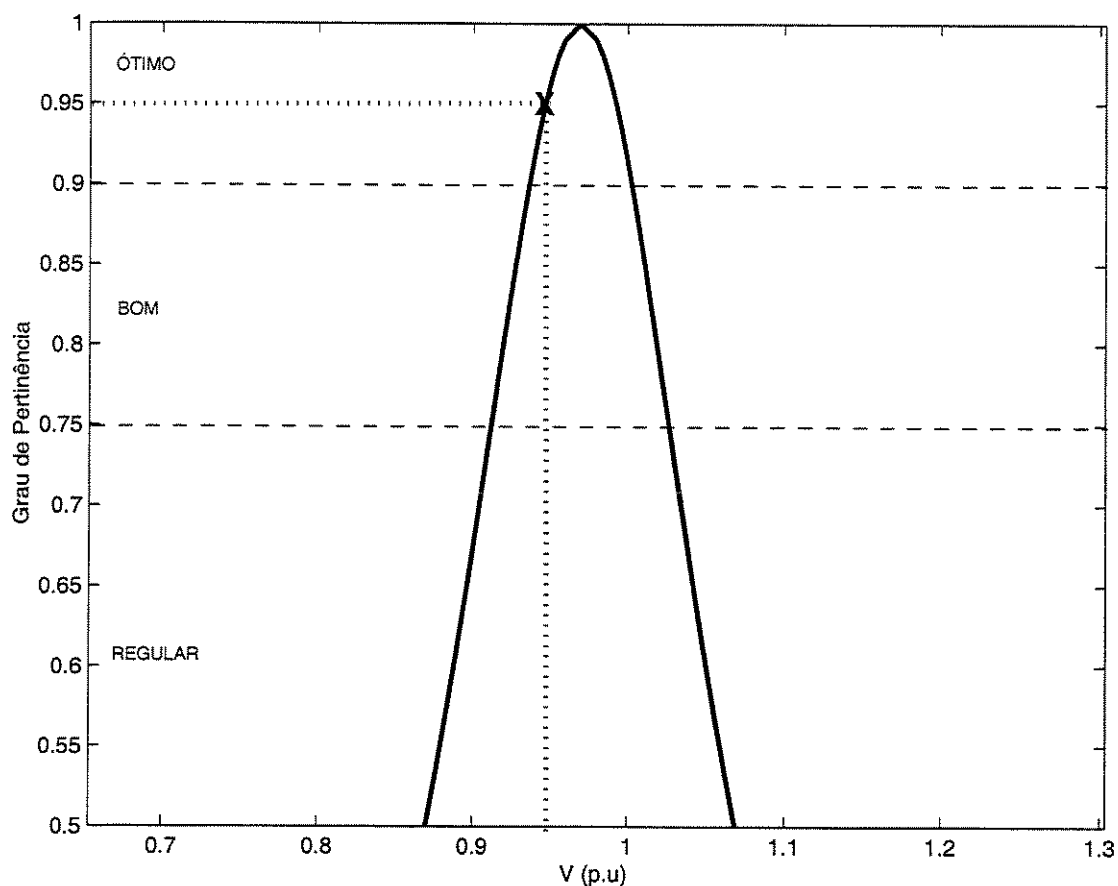


Figura 5.49: Destaque da variação de tensão na barra 14

Agora, fazendo uma análise da barra 46 após a saída o ramo 14-46, observa-se uma diminuição da tensão para 0,9611 pu. A figura 5.50 apresenta a variação de tensão na barra 46, sendo que para esta variação o grau de pertinência é de aproximadamente 0,4. De acordo com a faixa de variação para o grau de pertinência que foi estabelecida no capítulo 4, a tensão na barra 46, após a contingência, é classificada como *ruim*. Lingüísticamente, pode-se fazer a seguinte afirmação: “a tensão na barra 46 está ruim.

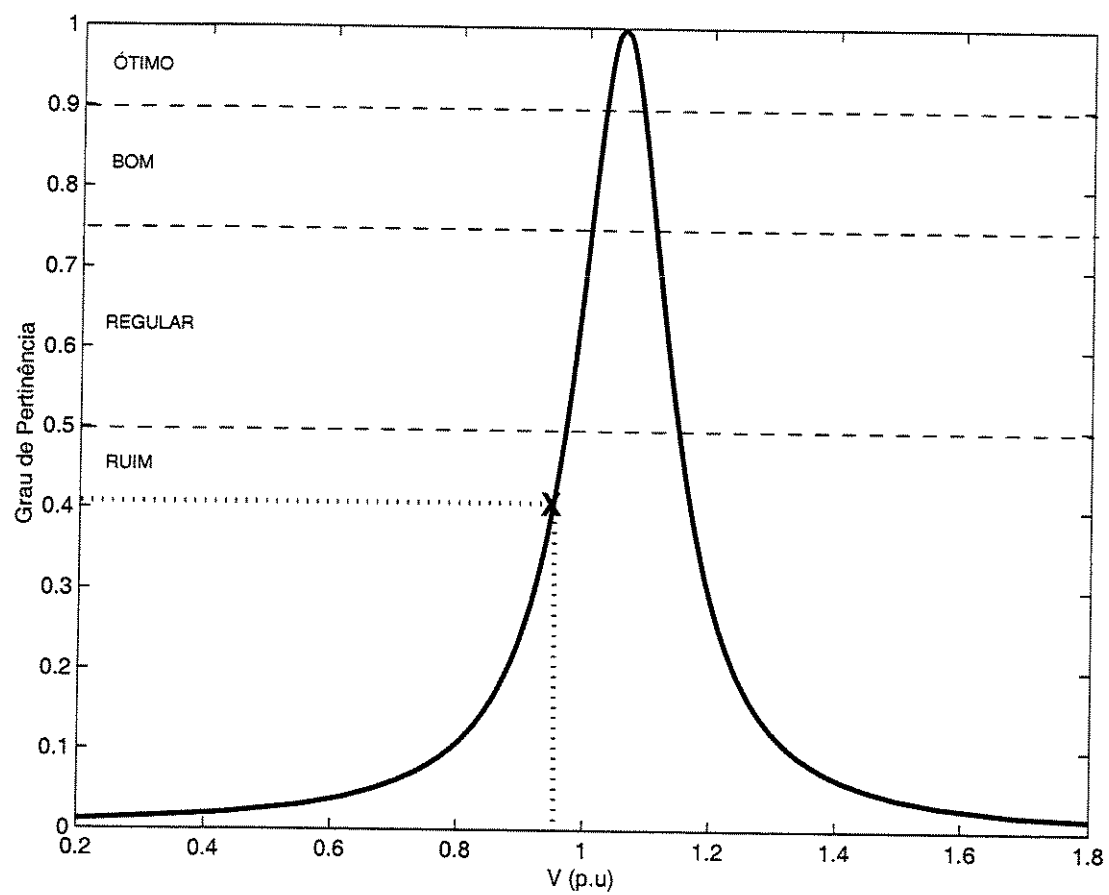


Figura 5.50: Análise da variação de tensão na barra 46

Do mesmo modo, simulou-se uma variação de fluxo de potência ativa, fazendo com que o resultado numérico seja transformado em resultado lingüístico.

A figura 5.51 traz a distribuição de possibilidades para o fluxo de potência ativa no ramo 4-5. Neste ramo o valor de m da distribuição de possibilidades é o próprio fluxo de potência ativa no ramo: 13,9814 MW.

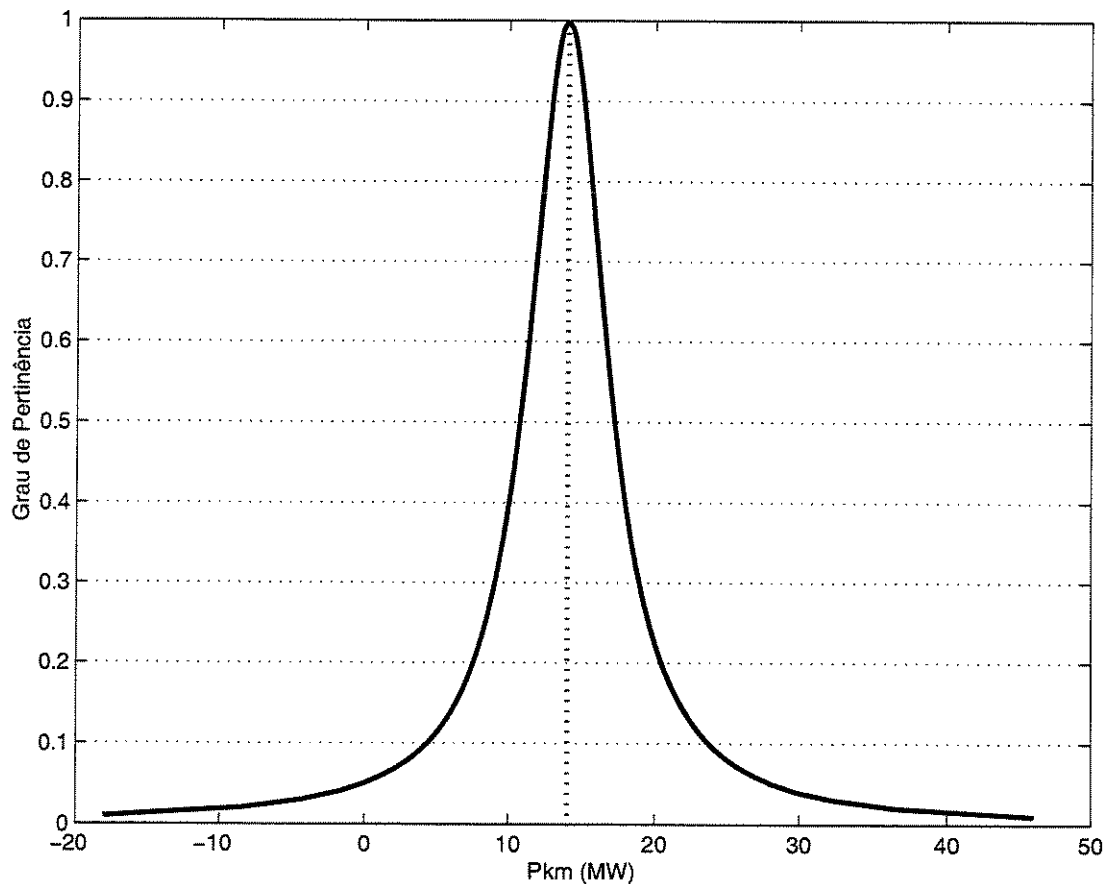


Figura 5.51: Distribuição de possibilidades para o fluxo de potência no ramo 4-5

A simulação considerou uma queda no fluxo de potência ativa de 13,9814 MW para 12,23620 MW. A figura 5.52 traz a função sinusoidal incorporando o valor medido do fluxo de potência ativa para o ramo 4-5, podendo-se observar a faixa de variação do grau de pertinência. Na figura 5.53 tem-se um destaque do valor medido, o que permite uma melhor análise do referido valor em relação ao grau de pertinência.

Esta simulação permite concluir que embora o fluxo de potência tenha diminuído, este pode ser classificado como *bom*, ou seja, pode-se afirmar que “o fluxo de potência ativa no

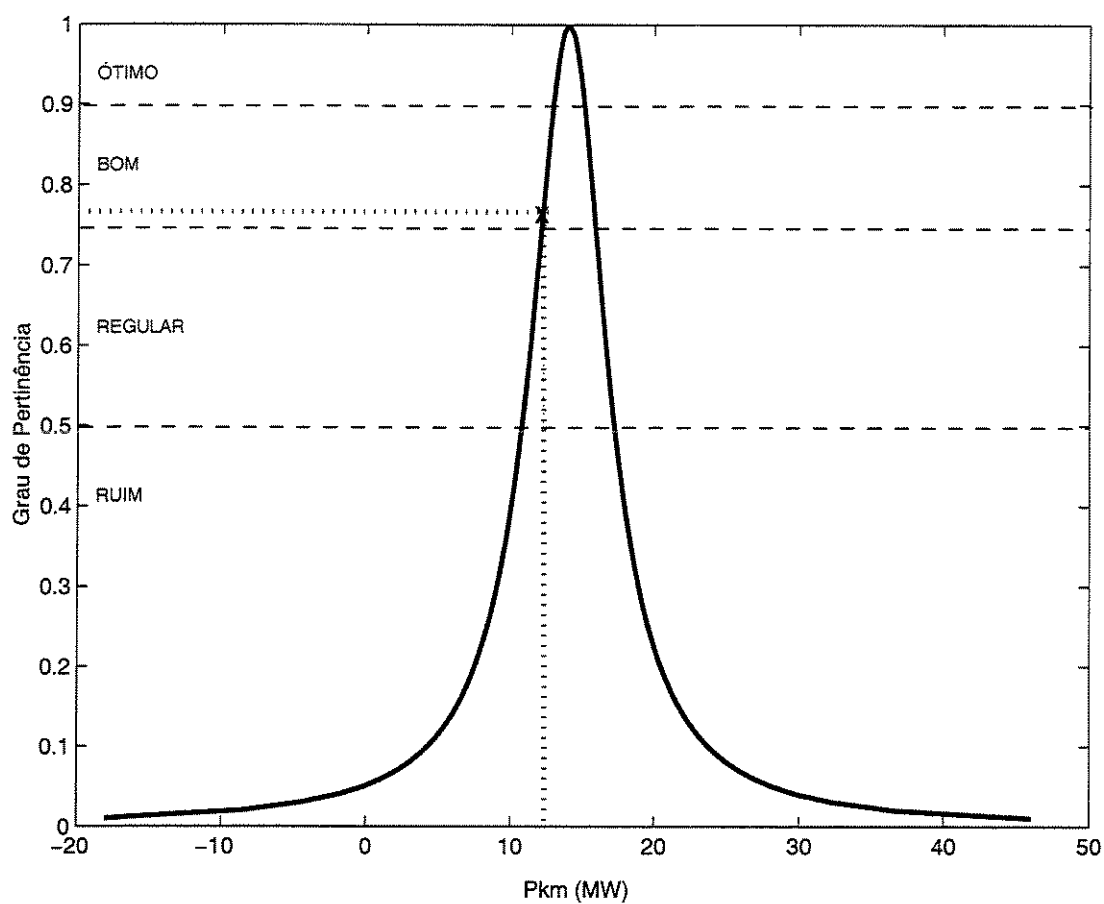


Figura 5.52: Análise da queda do fluxo de potência no ramo 4-5

ramo 4-5 é bom", pois o valor do fluxo de potência medido de 12,2362 MW apresenta um grau de pertinência em torno de 0,77.

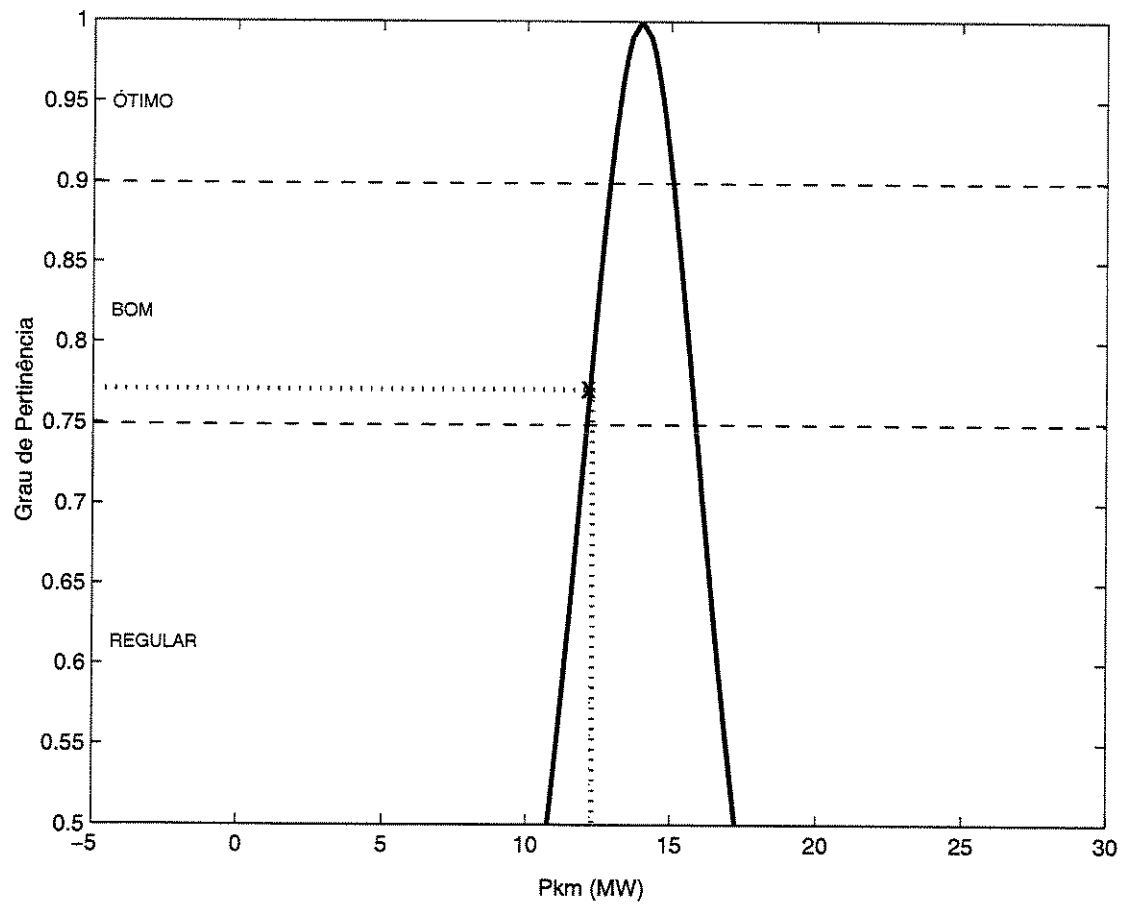


Figura 5.53: Destaque do fluxo de potência medido no ramo 4-5

Simulou-se ainda uma variação no fluxo de potência ativa no ramo 24-25 da rede em análise. A figura 5.54 traz a distribuição de possibilidades para o fluxo de potência ativa no ramo 24-25. Neste ramo o valor de m da distribuição de possibilidades é o próprio fluxo de potência ativa no ramo: 6,7945 MW.

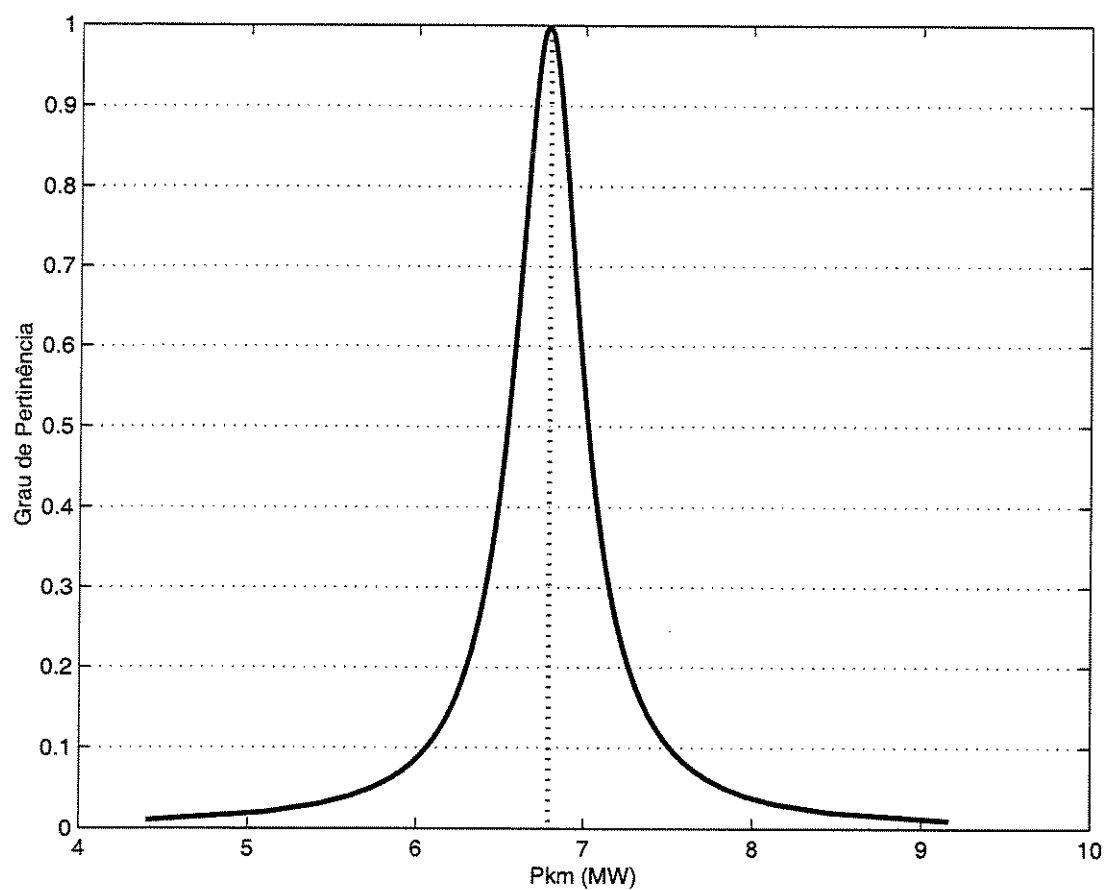


Figura 5.54: Distribuição de possibilidades para o fluxo de potência no ramo 24-25

A simulação considerou um aumento no fluxo de potência ativa de 6,7945 MW para 6,852 MW. A figura 5.55 traz a função sinusoidal incorporando o valor medido do fluxo de potência ativa para o ramo 24-25, podendo-se observar a faixa de variação do grau de pertinência. Na figura 5.56 tem-se um destaque do valor medido, o que permite uma melhor análise do referido valor em relação ao grau de pertinência.

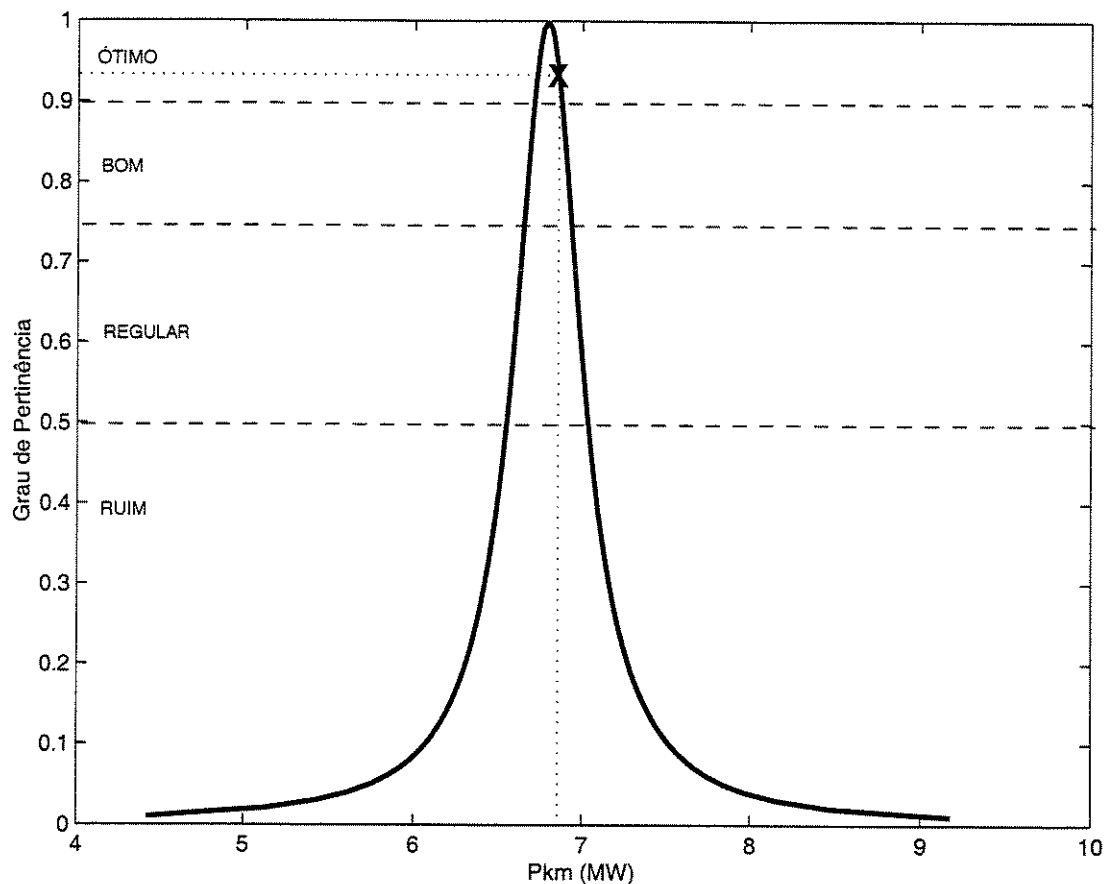


Figura 5.55: Análise do aumento do fluxo de potência no ramo 24-25

Esta simulação permite concluir que embora o fluxo de potência tenha aumentado, pode ser classificado como *ótimo*, ou seja, pode-se afirmar que “o fluxo de potência ativa no ramo 24-25 é ótimo”, pois o valor do fluxo de potência medido de 6,852 MW apresenta um grau de pertinência em torno de 0,922 e este encontra-se no intervalo $[0,9 \quad 1,0]$ que foi previamente determinado.

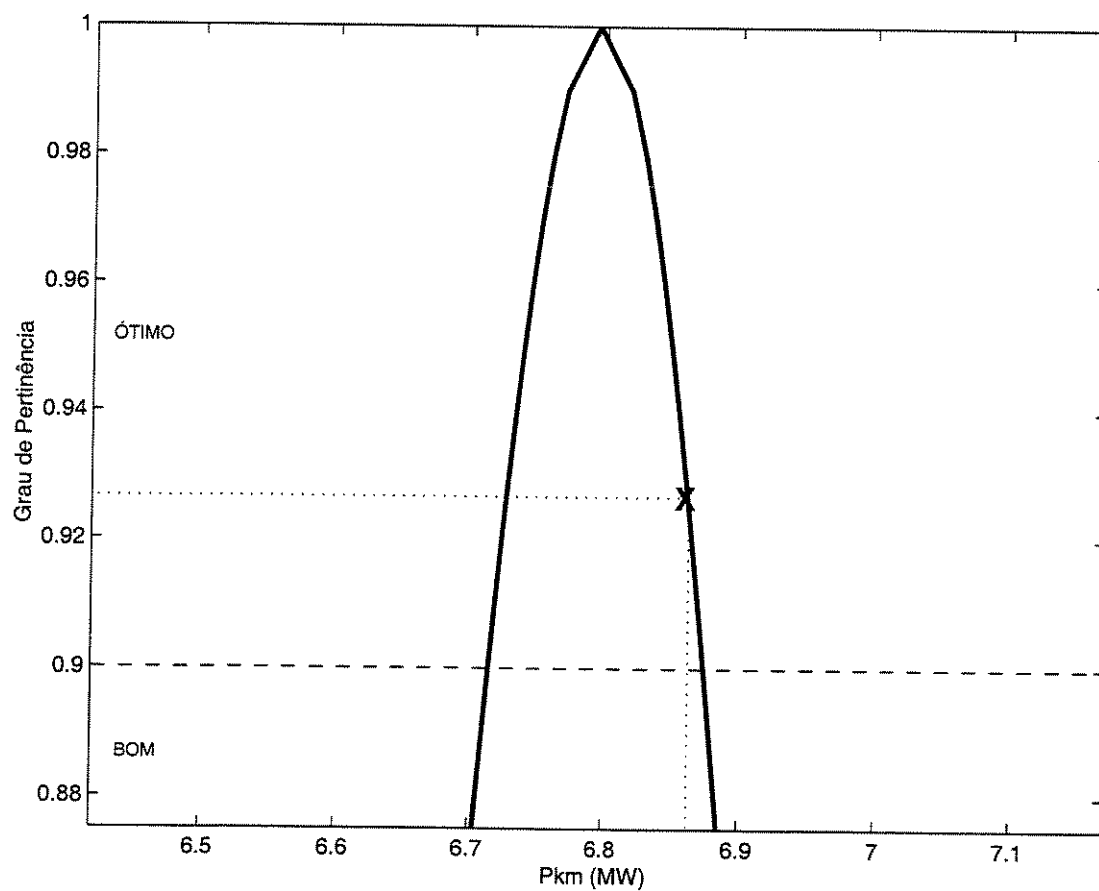


Figura 5.56: Destaque do fluxo de potência medido no ramo 24-25

Capítulo 6

Considerações Finais

Com o objetivo de adequar os resultados mais próximos da realidade, foi feita uma análise para traduzir os resultados numéricos em resultados lingüísticos.

O trabalho desenvolvido mostra como foi possível utilizar uma aplicação de lógica nebulosa para traduzir os resultados numéricos em resultados lingüísticos, o que permite fazer uma classificação das barras ou dos ramos de um sistema de energia elétrica, onde se determinou uma faixa de variação para o grau de pertinência. Para a representação dos números nebulosos foi utilizada a função de pertinência sinusoidal e os cálculos nebulosos foram efetuados com operadores nebulosos adequados a esta função de pertinência.

6.1 Tradução de Valores Numéricos em Resultados Lingüísticos

No capítulo 5 são apresentadas diferentes simulações que demonstram como uma metodologia baseada em conjuntos nebulosos possibilita a tradução de valores numéricos em resultados lingüísticos, indo de encontro com uma linguagem vivenciada no setor elétrico.

Os resultados para os sistemas analisados foram considerados satisfatórios, tendo em vista que foi possível qualificar as barras ou ramos (mesmo após a ocorrência de situações de contingência, por exemplo) de maneira adequada aos termos lingüísticos utilizados em centros de controle.

6.2 Propostas Futuras

6.2.1 Controle Automático Utilizando Lógica Nebulosa

A partir da possibilidade de se estabelecer perfis individuais para as variáveis do sistema, pode-se desenvolver um controle automático, o qual será capaz de verificar se a tensão em

uma barra está baixa ou se o fluxo de potência ativo em um ramo está alto, por exemplo.

Podem ser gerados bancos de dados com padrões do sistema, onde irão constar as distribuições de possibilidades das variáveis e as faixas para as quais deve-se emitir alerta ou até mesmo desligar uma barra ou um ramo.

6.2.2 Estabelecer Perfis para as Variáveis Utilizadas na Operação dos Sistemas

Os sistemas elétricos estão sujeitos a variações de potência, que em alguns casos são diárias devido às variações de carga durante os períodos do dia. Com isto pode tornar-se difícil a tarefa de controlar o sistema, pois tem-se que estar monitorando as diversas variáveis (tensão nas barras, fluxos nos ramos, etc.) e saber seus valores limites.

Pode-se, utilizando o FCSN, efetuar estudos para estabelecer perfis para as cargas, magnitudes das tensões, fluxos nos ramos, etc. Isto facilitará e tornará mais confiável a tomada de decisões no controle do sistema.

Isto pode ser implantado principalmente para as partes críticas do sistema, como os ramos que possuem maiores fluxos e as barras onde as tensões não podem sofrer grandes variações. Busca-se, assim, diminuir a possibilidade de erros durante a tomada de decisões.

Referências Bibliográficas

- [1] Abdul-Rahman, K. H. and Shahidehpour, S. M. (1993); A Fuzzy - Based Optimal Reactive Power Control; *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 8, No.2, pp. 662-670.
- [2] Abdul-Rahman, K.H. and Shahidehpour, S. M. (1994); Reactive Power Optimization Using Fuzzy Load Representation; *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 9, No.2, pp. 898-905.
- [3] Das, D.; Ghosh, S. and Srinivas, D. K. (1999); Fuzzy Distribution Load Flow; *Electric Machines and Power Systems*, Vol. 27, pp. 1215-1226.
- [4] Dhar, S. B. (1979); Power System Long-Range Decision Analysis Under Fuzzy Environment; *IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems*, Vol.2, pp. 585-596.
- [5] Fellei, Willian. (1976); Introdução à Teoria das Probabilidades e suas Aplicações, ed. Edgard Blucher LTDA
- [6] El-Harwary, M. E. (1998); Electric Power Applications of Fuzzy Systems; pp 1 -11, IEEE Press
- [7] Kenarangui, R. and Seifi, A. (1994); Fuzzy Power Flow Analysis; *Electric Power Systems Research*, Vol. 29, pp. 105-109.
- [8] Lima, Marcelo Murad Pereira (2000); Nova Concepção para Fluxo de Carga Fuzzy Incorporando Função de Pertinência Sinusoidal; Tese de Mestrado, UNICAMP - FEEC.
- [9] Miranda, V.; Matos, M. A. A. C. and Saraiva, J. T. (1990); Fuzzy Load Flow - New Algorithms Incorporating Uncertain Generation and Load Representation; *Proceeding of the Tenth Power Systems Computation Conference*, Graz, Austria, pp. 621-627.
- [10] Miranda, V. and Saraiva, J. T. (1992); Fuzzy Modelling of Power System Optimal Load Flow; *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol .7, No. 2, pp. 843 - 849.
- [11] Monticelli, A. (1983); Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica; Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo - Brasil
- [12] Momoh, J. A. and Tomsovic, K. (1995); Overview and Literature Survey of Fuzzy Set Theory in Power Systems; *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 10, No.3, pp. 1676-1690.

- [13] Pedrycz, W. and Gomide, F. (1998); An Introduction to Fuzzy Sets: Analysis and Design, MIT Press
- [14] Pereira, Marcelo Adorni (2000); Conjuntos Nebulosos e Algoritmos Genéticos Aplicados à Restauração de Redes de Distribuição de Energia Elétrica; Tese de Doutorado, UNICAMP - FEEC.
- [15] Tomsovic, K. (1992); A Fuzzy Linear Programming Approach to the Reactive/Voltage Control Problem; *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 7, No.1, pp. 287-293.
- [16] Verma, A. K.; Kumar, H. M. R. and Keshavan, B. K. (2000); A Fuzzy Logic Approach to Security-Based Bulk Power System Reliability Evaluation; *Electric Machines and Power Systems*, Vol.28, pp. 45-54.
- [17] Wang, Z and Alvarado, F. L.(1992); Interval Arithmetic in Power Flow Analysis; *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.7, No. 3, pp. 1341-1349.
- [18] Yokayama, R.; Niimura, T. and Nakanishi, Y. (1993); A Coordinated Control of Voltage and Reactive Power By Heuristic Modeling and Approximate Reasoning; *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 8, No.2, pp. 636-643.
- [19] Zadeh, L. A. (1965); Fuzzy Sets, *Information and Control*; Vol 8, pp 338 - 353.
- [20] Zadeh, L A (1978); Fuzzy Sets as a Basis for a Theory of Possibility; *Fuzzy Sets and System*; Vol. 1, pp 3 - 28.

Apêndice A

Modelagem do Transformador

Devido ao fato de existirem vários modelos para os transformadores com tap variável, a seguir é apresentada a representação adotada para transformador (figura A.1) e as expressões para os fluxos de potências para o mesmo.

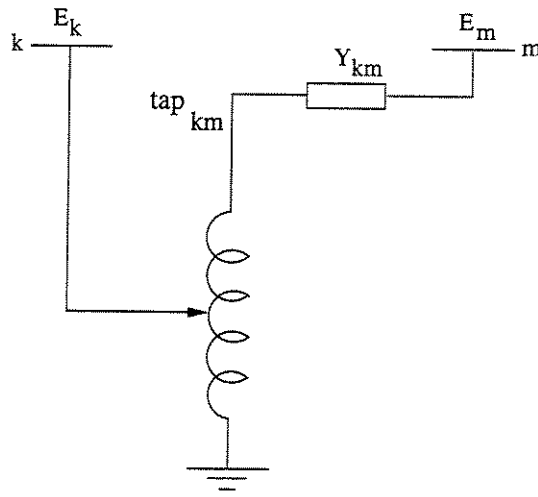


Figura A.1: Modelo de transformador

$$\begin{aligned} P_{km} &= V_k^2 \cdot g_{km} \cdot tap_{km}^2 - tap_{km} \cdot V_k \cdot V_m \cdot (g_{km} \cdot \cos(\theta_{km}) + b_{km} \cdot \sin(\theta_{km})) \\ P_{mk} &= V_m^2 \cdot g_{km} - tap_{km} \cdot V_k \cdot V_m \cdot (g_{km} \cdot \cos(\theta_{km}) - b_{km} \cdot \sin(\theta_{km})) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{km} &= -V_k^2 \cdot (b_{km} + b_{km}^{sh}) \cdot tap_{km}^2 - tap_{km} \cdot V_k \cdot V_m \cdot (g_{km} \cdot \sin(\theta_{km}) - b_{km} \cdot \cos(\theta_{km})) \\ Q_{mk} &= -V_m^2 \cdot (b_{km} + b_{km}^{sh}) + tap_{km} \cdot V_k \cdot V_m \cdot (g_{km} \cdot \sin(\theta_{km}) + b_{km} \cdot \cos(\theta_{km})) \end{aligned}$$

Apêndice B

Banco de Dados e Configuração das Redes

São disponibilizados os bancos de dados para os sistemas IEEE30 barras e IEEE57 barras utilizados neste trabalho, e suas respectivas configurações.

B.1 Sistema 30 Barras

Tabela B.1: Dados de barras para o sistema 30 barras

Barra	Tipo	V(pu)	θ (rad)	P(pu)	Q(pu)	Shunt
1	2	1,060	0,00	-	-	-
2	1	1,045	-	-0,2170	-0,1270	-
3	0	-	-	-0,0240	-0,0120	-
4	0	-	-	-0,0760	-0,0160	-
5	1	1,010	-	-0,9420	-0,1900	-
6	0	-	-	-	-	-
7	0	-	-	-0,2280	-0,1090	-
8	1	1,010	-	-0,3000	-0,3000	-
9	0	-	-	-	-	-
10	0	-	-	-0,0580	-0,0200	0,19
11	1	1,082	-	-	-	-
12	0	-	-	-0,1120	-0,0750	-
13	1	1,075	-	-	-	-
14	0	-	-	-0,0620	-0,0160	-
15	0	-	-	-0,0820	-0,0250	-
16	0	-	-	-0,0350	-0,0180	-
17	0	-	-	-0,0900	-0,0580	-
18	0	-	-	-0,0320	-0,0090	-
19	0	-	-	-0,0950	-0,0340	-
20	0	-	-	-0,0220	-0,0070	-
21	0	-	-	-0,1750	-0,1120	-
22	0	-	-	-	-	-
23	0	-	-	-0,0320	-0,0160	-
24	0	-	-	-0,0870	-0,0670	0,043
25	0	-	-	-	-	-
26	0	-	-	-0,0350	-0,0230	-
27	0	-	-	-	-	-
28	0	-	-	-	-	-
29	0	-	-	-0,0240	-0,0090	-
30	0	-	-	-0,1060	-0,0190	-

Na coluna Tipo:

2 - barra tipo $V\theta$ (*slack*)

1 - barra tipo PV

0 - barra tipo PQ

Tabela B.2: Dados dos ramos para o sistema 30 barras (pu)

Ramo	r	x	b^{sh}	tap
1-2	0,01920	0,05750	0,05280	-
1-3	0,04520	0,18520	0,04080	-
2-4	0,05700	0,17370	0,03680	-
3-4	0,01320	0,03790	0,00840	-
2-5	0,04720	0,19830	0,04180	-
2-6	0,05810	0,17630	0,03740	-
4-6	0,01190	0,04140	0,00900	-
5-7	0,04600	0,11600	0,02040	-
6-7	0,02670	0,08200	0,01700	-
6-8	0,01200	0,04200	0,00000	-
6-9	0,00000	0,20800	0,00000	0,9780
6-10	0,00000	0,55600	0,00000	0,9690
9-11	0,00000	0,20800	0,00000	-
9-10	0,00000	0,11000	0,00000	-
4-12	0,00000	0,25600	0,00000	0,9320
12-13	0,00000	0,14000	0,00000	-
12-14	0,12310	0,25590	0,00000	-
12-15	0,06620	0,13040	0,00000	-
12-16	0,09450	0,19870	0,00000	-
14-15	0,22100	0,19970	0,00000	-
16-17	0,08240	0,19230	0,00000	-
15-18	0,10700	0,21850	0,00000	-
18-19	0,06390	0,12920	0,00000	-
19-20	0,03400	0,06800	0,00000	-
10-20	0,09360	0,20900	0,00000	-
10-17	0,03240	0,08450	0,00000	-
10-21	0,03480	0,07490	0,00000	-
10-22	0,07270	0,14990	0,00000	-
21-22	0,01160	0,02360	0,00000	-
15-23	0,10000	0,20200	0,00000	-
22-24	0,11500	0,17900	0,00000	-
23-24	0,13200	0,27000	0,00000	-
24-25	0,18850	0,32930	0,00000	-
25-26	0,25440	0,38000	0,00000	-
25-27	0,10930	0,20870	0,00000	-
28-27	0,00000	0,39600	0,00000	0,9680
27-29	0,21980	0,41530	0,00000	-
27-30	0,32020	0,60270	0,00000	-
29-30	0,23990	0,45330	0,00000	-
8-28	0,06360	0,20000	0,04280	-
6-28	0,01690	0,05990	0,01300	-

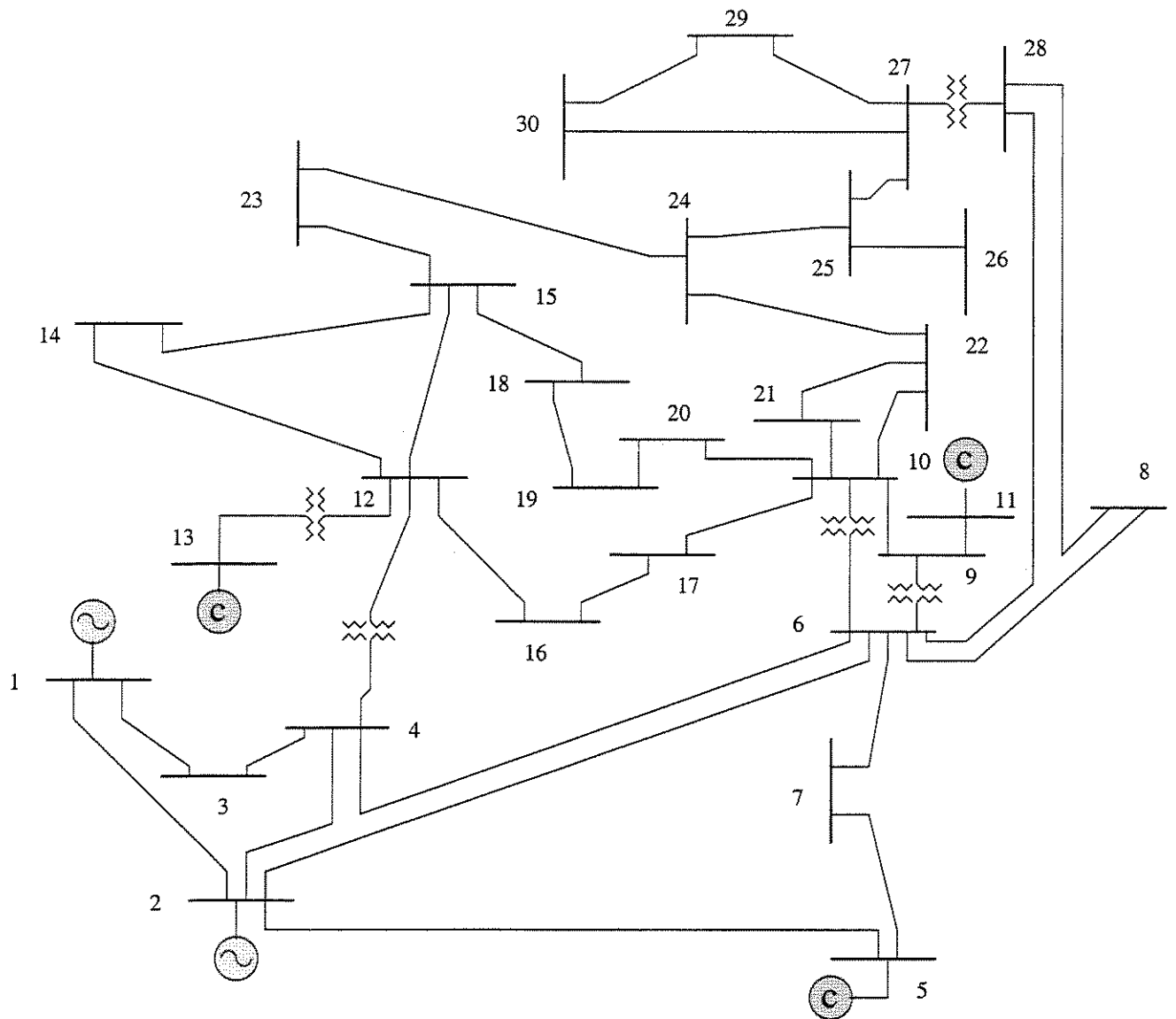


Figura B.1: Configuração do Sistema IEEE30 Barras

B.2 Sistema 57 Barras

Tabela B.3: Dados de barras para o sistema 57 barras

Barra	Tipo	V(pu)	θ (rad)	P(pu)	Q(pu)	Shunt
1	2	1,040	0,00	-0,5500	-0,1700	-
2	1	1,010	-	-0,0300	-0,8800	-
3	1	0,985	-	-0,4100	-0,2100	-
4	0	-	-	-	-	-
5	0	-	-	-0,1300	-0,0400	-
6	1	0,980	-	-0,7500	-0,0200	-
7	0	-	-	-	-	-
8	1	1,005	-	-1,5000	-0,2200	-
9	1	0,980	-	-1,2100	-0,2600	-
10	0	-	-	-0,0500	-0,0200	-
11	0	-	-	-	-	-
12	1	1,015	-	-3,7700	-0,2400	-
13	0	-	-	-0,1800	-0,0230	-
14	0	-	-	-0,1050	-0,0530	-
15	0	-	-	-0,2200	-0,0500	-
16	0	-	-	-0,4300	-0,0300	-
17	0	-	-	-0,4200	-0,0800	-
18	0	-	-	-0,2720	-0,0980	0,10
19	0	-	-	-0,0330	-0,0060	-
20	0	-	-	-0,0230	-0,0100	-
21	0	-	-	-	-	-
22	0	-	-	-	-	-
23	0	-	-	-0,0630	-0,0210	-
24	0	-	-	-	-	-
25	0	-	-	-0,0630	-0,0320	0,059
26	0	-	-	-	-	-
27	0	-	-	-0,0930	-0,0050	-
28	0	-	-	-0,0460	-0,0230	-
29	0	-	-	-0,1700	-0,0260	-
30	0	-	-	-0,0360	-0,0180	-
31	0	-	-	-0,0580	-0,0290	-
32	0	-	-	-0,0160	-0,0080	-
33	0	-	-	-0,0380	-0,0190	-
34	0	-	-	-	-	-
35	0	-	-	-0,0600	-0,0300	-
36	0	-	-	-	-	-
37	0	-	-	-	-	-
38	0	-	-	-0,1400	-0,0700	-
39	0	-	-	-	-	-
40	0	-	-	-	-	-
41	0	-	-	-0,0630	-0,0300	-
42	0	-	-	-0,0710	-0,0440	-
43	0	-	-	-0,0200	-0,0100	-
44	0	-	-	-0,1200	-0,0180	-
45	0	-	-	-	-	-

continua na próxima página

Tabela B.3: Dados de barras para o sistema 57 barras (continuação)

Barra	Tipo	V(pu)	θ (rad)	P(pu)	Q(pu)	Shunt
46	0	-	-	-	-	-
47	0	-	-	-0,2970	-0,1160	-
48	0	-	-	-	-	-
49	0	-	-	-0,1800	-0,0850	-
50	0	-	-	-0,2100	-0,1050	-
51	0	-	-	-0,1800	-0,0530	-
52	0	-	-	-0,0490	-0,0220	-
53	0	-	-	-0,2000	-0,1000	0,063
54	0	-	-	-0,0410	-0,0140	-
55	0	-	-	-0,0680	-0,0340	-
56	0	-	-	-0,0760	-0,0220	-
57	0	-	-	-0,0670	-0,0200	-

Tabela B.4: Dados dos ramos para o sistema 57 barras (pu)

Ramo	r	x	b^{sh}	tap
1-2	0,0083	0,0280	0,1290	-
2-3	0,0298	0,0850	0,0818	-
3-4	0,0112	0,0366	0,0380	-
4-5	0,0625	0,1320	0,0258	-
4-6	0,0430	0,1480	0,0348	-
6-7	0,0200	0,1020	0,0276	-
6-8	0,0339	0,1730	0,0470	-
8-9	0,0099	0,0505	0,0548	-
9-10	0,0369	0,1679	0,0440	-
9-11	0,0258	0,0848	0,0218	-
9-12	0,0648	0,2950	0,0772	-
9-13	0,0481	0,1580	0,0406	-
13-14	0,0132	0,0434	0,0110	-
13-15	0,0269	0,0869	0,0230	-
1-15	0,0178	0,0910	0,0988	-
1-16	0,0454	0,2060	0,0546	-
1-17	0,0238	0,1080	0,0286	-
3-15	0,0162	0,0530	0,0544	-
4-18	0,0000	0,5550	0,0000	0,970
4-18	0,0000	0,4300	0,0000	0,978
5-6	0,0302	0,0641	0,0124	-
7-8	0,0139	0,0712	0,0194	-
10-12	0,0277	0,1262	0,0328	-
11-13	0,0223	0,0732	0,0188	-
12-13	0,0178	0,0580	0,0604	-
12-16	0,0180	0,0813	0,0216	-
12-17	0,0397	0,1790	0,0476	-
14-15	0,0171	0,0547	0,0148	-
18-19	0,4610	0,6850	0,0000	-
19-20	0,2830	0,4340	0,0000	-
21-20	0,0000	0,7767	0,0000	1,043
21-22	0,0736	0,1170	0,0000	-
22-23	0,0099	0,0152	0,0000	-
23-24	0,1660	0,2560	0,0084	-
24-25	0,0000	1,1820	0,0000	1,000
24-25	0,0000	1,2300	0,0000	1,000
24-26	0,0000	0,0473	0,0000	1,043
26-27	0,1650	0,2540	0,0000	-
27-28	0,0618	0,0954	0,0000	-
28-29	0,0418	0,0587	0,0000	-
7-29	0,0000	0,0648	0,0000	0,967
25-30	0,1350	0,2020	0,0000	-
30-31	0,3260	0,4970	0,0000	-
31-32	0,5070	0,7550	0,0000	-
32-33	0,0392	0,0360	0,0000	-
34-32	0,0000	0,9530	0,0000	0,975
34-35	0,0520	0,0780	0,0032	-
35-36	0,0430	0,0537	0,0016	-

continua na próxima página

Tabela B.4: Dados dos ramos para o sistema 57 barras (pu)
(continuação)

Ramo	r	x	b^{sh}	tap
36-37	0,0290	0,0366	0,0000	-
37-38	0,0651	0,1009	0,0020	-
37-39	0,0239	0,0379	0,0000	-
36-40	0,0300	0,0466	0,0000	-
22-38	0,0192	0,0295	0,0000	-
11-41	0,0000	0,7490	0,0000	0,955
41-42	0,2070	0,3520	0,0000	-
41-43	0,0000	0,4120	0,0000	-
38-44	0,0289	0,0585	0,0020	-
15-45	0,0000	0,1042	0,0000	0,955
14-46	0,0000	0,0735	0,0000	0,900
46-47	0,0230	0,0680	0,0032	-
47-48	0,0182	0,0233	0,0000	-
48-49	0,0834	0,1290	0,0048	-
49-50	0,0801	0,1280	0,0000	-
50-51	0,1386	0,2200	0,0000	-
10-51	0,0000	0,0712	0,0000	0,930
13-49	0,0000	0,1910	0,0000	0,895
29-52	0,1442	0,1870	0,0000	-
52-53	0,0762	0,0984	0,0000	-
53-54	0,1878	0,2320	0,0000	-
54-55	0,1732	0,2265	0,0000	-
11-43	0,0000	0,1530	0,0000	0,958
44-45	0,0624	0,1242	0,0040	-
40-56	0,0000	1,1950	0,0000	0,958
56-41	0,5530	0,5490	0,0000	-
56-42	0,2125	0,3540	0,0000	-
39-57	0,0000	1,3550	0,0000	0,980
57-56	0,1740	0,2600	0,0000	-
38-49	0,1150	0,1770	0,0060	-
38-48	0,0312	0,0482	0,0000	-
9-55	0,0000	0,1205	0,0000	0,940

Apêndice C

Resultados Completos

Estão disponibilizados os resultados completos dos fluxos de carga (FCNR, FCSN e FCSD) para as redes que foram testadas. Nas tabelas C.1, C.2, C.3, C.4 e C.5 são apresentados os resultados do FCNR para a rede de 3 barras.

Os resultados para o sistema IEEE30 barras encontram-se nas tabelas C.6, C.7, C.8 e C.9, obtidos com o FCNR. Os resultados utilizando o FCSN estão nas tabelas C.10, C.11, C.12, e C.13, enquanto que os resultados com o FCSD são encontrados nas tabelas C.14, C.15, e C.16.

Os resultados para o sistema IEEE57 barras apresentam-se nas tabelas C.17, C.18, C.19 e C.20, obtidos com o FCNR. Os resultados utilizando o FCSN encontra-se nas tabelas C.21, C.22, C.23 e C.24, enquanto que os resultados com o FCSD são encontrados nas tabelas C.25, C.26 e C.27.

C.1 Sistema 3 barras

Tabela C.1: Tensões e ângulos para o FCNR

Barra	V [pu]	θ [rad]
1	1,0000	-0,0000
2	0,9827	-0,1153
3	0,9800	-0,1809

Tabela C.2: Potências ativa e reativa (pu) geradas nas barras

Barra	P.Ativa	P.Reativa
1	0,2033	-0,0086
3	-	-0,0162

Tabela C.3: Fluxos de potência ativa (pu) nos ramos

Ramo	P_{km}	P_{mk}
1-2	0,1143	-0,1130
1-3	0,0891	-0,0874
2-3	0,0630	-0,0626

Tabela C.4: Fluxos de potência reativa (pu) nos ramos

Ramo	Q_{km}	Q_{mk}
1-2	0,0024	-0,0088
1-3	-0,0109	-0,0123
2-3	-0,0112	-0,0040

Tabela C.5: Perdas ativas (pu) na transmissão

Ramo	P_{perdas}
1-2	0,001321
1-3	0,001603
2-3	0,000411

C.2 Sistema IEEE30 Barras

C.2.1 Resultados para o FCNR

Tabela C.6: Magnitudes e ângulos das tensões para FCNR

Barra	Tensões (pu)	Ângulos (graus)
1	1,0600	0,0000
2	1,0450	-5,5278
3	1,0210	-7,9872
4	1,0122	-9,6413
5	1,0100	-14,3765
6	1,0106	-11,3658
7	1,0026	-13,1292
8	1,0100	-12,1094
9	1,0510	-14,4165
10	1,0452	-16,0109
11	1,0820	-14,4165
12	1,0574	-15,2783
13	1,0710	-15,2783
14	1,0425	-16,1673
15	1,0379	-16,2559
16	1,0450	-15,8614
17	1,0398	-16,1732
18	1,0284	-16,8641
19	1,0258	-17,0341
20	1,0299	-16,8356
21	1,0328	-16,4541
22	1,0334	-16,4400
23	1,0274	-16,6406
24	1,0217	-16,6406
25	1,0176	-16,3757
26	0,9999	-16,7952
27	1,0235	-16,7952
28	1,0071	-11,9891
29	1,0037	-17,0773
30	0,9922	-17,9596

Tabela C.7: Potências ativa e reativa geradas nas barras para FCNR

Barra	Potência ativa (MW)	Potência Reativa (MVar)
1	261,0371	20,3579
2	-	44,4390
5	-	16,6843
8	-	6,2838
11	-	16,1104
13	-	10,4088

Tabela C.8: Fluxos de potências ativa e re-
ativa para FCNR

Ramo	P_{km} (MW)	Q_{km} (MVar)
1-2	177,9552	-25,7769
1-3	83,0819	5,4190
2-4	45,7389	4,2539
3-4	77,8812	-2,8376
2-5	83,0654	2,7253
2-6	61,9506	1,0598
4-6	70,0739	-15,3679
5-7	-14,1277	11,2490
6-7	37,4534	-2,6096
6-8	29,5692	-7,3441
6-9	27,7874	-8,0692
6-10	15,8769	0,2100
9-11	0,0000	-15,6493
9-10	27,7874	5,9490
4-12	44,0650	14,3497
12-13	0,0000	-10,2766
12-14	7,8476	2,4189
12-15	17,8402	6,8549
12-16	7,1773	3,1918
14-15	1,5734	0,6646
16-17	3,6251	1,2821
15-18	5,9883	1,6410
18-19	2,7500	0,6628
19-20	-6,7548	-2,7470
10-20	9,0537	3,6639
10-17	5,4009	4,5827
10-21	15,7892	9,9899
10-22	7,6205	4,5863
21-22	-1,8220	-1,4494
15-23	5,0030	2,9471
22-24	5,7453	3,0271
23-24	1,7717	1,2839
24-25	-1,2344	2,0171
25-26	3,5446	2,3667
25-27	-4,7891	-0,3672
28-27	18,0955	5,0362
27-29	6,1900	1,6688
27-30	7,0920	1,6628
29-30	3,7037	0,6059
8-28	-0,5391	-0,5208
6-28	18,6944	0,0920

Tabela C.9: Perdas ativas na transmissão
para FCNR

Ramo	Perdas (MW)
1-2	5,500330
1-3	2,800686
2-4	1,112455
3-4	0,768769
2-5	2,993129
2-6	2,047017
4-6	0,596083
5-7	0,158109
6-7	0,367538
6-8	0,108308
6-9	0,000000
6-10	0,000000
9-11	0,000000
9-10	0,000000
4-12	0,000000
12-13	0,000000
12-14	0,074247
12-15	0,216266
12-16	0,052149
14-15	0,005932
16-17	0,011156
15-18	0,038292
18-19	0,004835
19-20	0,017181
10-20	0,081732
10-17	0,014880
10-21	0,111204
10-22	0,052643
21-22	0,000589
15-23	0,031297
22-24	0,045417
23-24	0,005987
24-25	0,010098
25-26	0,044633
25-27	0,024354
28-27	0,000000
27-29	0,086240
27-30	0,162194
29-30	0,033543
8-28	0,001904
6-28	0,057928

C.2.2 Resultados para o FCSN

Tabela C.10: Magnitudes e ângulos das tensões para FCSN

Barra	Tensões (pu)		Ângulos (graus)	
	m	α	m	α
1	1,0600	0,00000	0,0000	0,00000
2	1,0450	0,00000	-5,5278	0,28850
3	1,0210	0,0124	-7,9872	0,38834
4	1,0122	0,0135	-9,6413	0,47258
5	1,0100	0,00000	-14,3765	0,63245
6	1,0106	0,00103	-11,3658	0,55049
7	1,0026	0,00108	-13,1292	0,61042
8	1,0100	0,00000	-12,1094	0,59309
9	1,0510	0,00171	-14,4165	0,71258
10	1,0452	0,00283	-16,0109	0,79995
11	1,0820	0,00000	-14,4165	0,71258
12	1,0574	0,00181	-15,2783	0,77250
13	1,0710	0,00000	-15,2783	0,77250
14	1,0425	0,00267	-16,1673	0,81943
15	1,0379	0,00296	-16,2559	0,82155
16	1,0450	0,00262	-15,8614	0,79865
17	1,0398	0,00305	-16,1732	0,81098
18	1,0284	0,00357	-16,8641	0,85299
19	1,0258	0,00377	-17,0341	0,86100
20	1,0299	0,00358	-16,8356	0,84876
21	1,0328	0,00351	-16,4541	0,82405
22	1,0334	0,00348	-16,4400	0,82301
23	1,0274	0,00366	-16,6406	0,83801
24	1,0217	0,00413	-16,8092	0,84066
25	1,0176	0,00375	-16,3757	0,82667
26	0,9999	0,00472	-16,7952	0,85117
27	1,0235	0,00304	-15,8479	0,80276
28	1,0071	0,00118	-11,9891	0,58169
29	1,0037	0,00416	-17,0773	0,87293
30	0,9922	0,00480	-17,9596	0,92492

Tabela C.11: Potências ativa e reativa geradas nas barras para FCSN

Barra	Potência ativa (MW)		Potência Reativa (MVar)	
	m	α	m	α
1	261,0371	14,37849	-20,3579	5,99442
2	-	-	44,4390	7,49538
5	-	-	16,6843	1,15666
8	-	-	6,2838	3,30378
11	-	-	16,1104	0,88895
13	-	-	10,4088	1,38519

Tabela C.12: Fluxos de potências ativa e reativa para FCSN

Ramo	P_{km} (MW)		Q_{km} (MW)	
	m	α	m	α
1-2	177,9552	8,9672	-25,77687	2,0599
1-3	83,0819	3,5640	5,41901	0,3029
2-4	45,7389	1,5022	4,25395	0,2992
3-4	77,8812	1,2300	-2,83762	0,8419
2-5	83,0654	3,0985	2,72526	0,2460
2-6	61,9506	2,2919	1,05981	0,0079
4-6	70,0739	1,4007	-15,36792	1,5263
5-7	-14,1277	0,0195	11,24896	0,6936
6-7	37,4534	0,3324	-2,60961	0,2825
6-8	29,5692	0,9944	-7,34411	1,8395
6-9	27,7874	1,4054	-8,06916	0,2384
6-10	15,8769	0,7947	0,20995	0,2623
9-11	0,0000	0,0000	-15,64927	0,8875
9-10	27,7874	1,4054	5,94905	1,0440
4-12	44,0650	2,2096	14,34975	0,0622
12-13	0,0000	0,0000	-10,27661	1,3828
12-14	7,8476	0,1389	2,41893	0,1649
12-15	17,8402	0,1672	6,85489	0,4922
12-16	7,1773	0,0296	3,19175	0,2676
14-15	1,5734	0,0719	0,66458	0,0630
16-17	3,6251	0,0137	1,28210	0,1607
15-18	5,9883	0,0925	1,64098	0,1425
18-19	2,7500	0,0239	0,66278	0,0839
19-20	-6,7548	0,3839	-2,74699	0,3762
10-20	9,0537	0,2136	3,66385	0,1707
10-17	5,4009	0,1183	4,58274	0,1684
10-21	15,7892	0,1124	9,98990	0,5863
10-22	7,6205	0,0376	4,58629	0,2727
21-22	-1,8220	0,1143	-1,44944	0,1303
15-23	5,0030	0,0280	2,94714	0,2401
22-24	5,7453	0,0543	3,02710	0,2008
23-24	1,7717	0,0601	1,28392	0,1448
24-25	-1,2344	0,1047	2,01711	0,1154
25-26	3,5446	0,0517	2,36667	0,1405
25-27	-4,7891	0,3023	-0,36720	0,3605
28-27	18,0988	0,9643	5,03619	0,4153
27-29	6,1900	0,1111	1,66881	0,1084
27-30	7,0920	0,1400	1,66280	0,1114
29-30	3,7037	0,0899	0,60587	0,0404
8-28	-0,5391	0,0797	-0,52080	0,5106
6-28	18,6944	0,1539	0,09199	0,0053

Tabela C.13: Perdas ativas na transmissão para FCSN

Ramo	Perdas (MW)	
	m	α
1-2	5,500330	0,56142292
1-3	2,800686	0,26228187
2-4	1,112455	0,09722758
3-4	0,768769	0,07153283
2-5	2,993129	0,22142447
2-6	2,047017	0,17571708
4-6	0,596083	0,05153037
5-7	0,158109	0,00991929
6-7	0,367538	0,02291625
6-8	0,108308	0,01220178
6-9	0,000000	0,00000000
6-10	0,000000	0,00000000
9-11	0,000000	0,00000000
9-10	0,000000	0,00000000
4-12	0,000000	0,00000000
12-13	0,000000	0,00000000
12-14	0,074247	0,00807880
12-15	0,216266	0,02373960
12-16	0,052149	0,00594531
14-15	0,005932	0,00073324
16-17	0,011156	0,00131964
15-18	0,038292	0,00427278
18-19	0,004835	0,00055758
19-20	0,017181	0,00178731
10-20	0,081732	1,63893344
10-17	0,014880	0,00138804
10-21	0,111204	0,01207475
10-22	0,052643	0,00571313
21-22	0,000589	0,00006314
15-23	0,031297	0,00370483
22-24	0,045417	2,59281657
23-24	0,005987	0,00084298
24-25	0,010098	0,00004617
25-26	0,044633	0,00499192
25-27	0,024354	2,00344156
28-27	0,000000	0,00000000
27-29	0,086240	0,00951212
27-30	0,162194	0,01789271
29-30	0,033543	0,00369933
8-28	0,001904	0,00132496
6-28	0,057928	0,00559804

C.2.3 Resultados para o FCSD

Os resultados para as magnitudes e ângulos das tensões utilizando FCSD são idênticos aos resultados utilizando FNCS.

Tabela C.14: Potências ativa e reativa geradas nas barras para FCSD

Barra	Potência ativa (MW)		Potência Reativa (MVar)	
	m	α	m	α
1	261,0371	12,86466	-20,3579	1,75745
2	-	-	44,4390	3,80113
5	-	-	16,6843	2,09966
8	-	-	6,2838	3,34803
11	-	-	16,1104	0,88895
13	-	-	10,4088	1,38519

Tabela C.15: Fluxos de potências ativa e reativa para FCSD

Ramo	P_{km} (MW)		Q_{km} (MW)	
	m	α	m	α
1-2	177,9552	8,9672	-25,77687	2,0599
1-3	83,0819	3,8975	5,41901	0,3024
2-4	45,7389	1,9911	4,25395	0,2986
3-4	77,8812	3,5149	-2,83762	0,8376
2-5	83,0654	3,0985	2,72526	0,2460
2-6	61,9506	2,6651	1,05981	0,0073
4-6	70,0739	2,7549	-15,36792	1,4880
5-7	-14,1277	0,0511	11,24896	0,9234
6-7	37,4534	1,1213	-2,60961	0,2779
6-8	29,5692	0,9924	-7,34411	2,7377
6-9	27,7874	1,4016	-8,06916	0,4117
6-10	15,8769	0,7915	0,20995	0,3996
9-11	0,0000	0,0000	-15,64927	0,8381
9-10	27,7874	1,4016	5,94905	1,1076
4-12	44,0650	2,2026	14,34975	0,3602
12-13	0,0000	0,0000	-10,27661	1,3500
12-14	7,8476	0,3993	2,41893	0,1560
12-15	17,8402	0,8918	6,85489	0,4671
12-16	7,1773	0,3516	3,19175	0,2559
14-15	1,5734	0,0813	0,66458	0,0595
16-17	3,6251	0,1708	1,28210	0,1537
15-18	5,9883	0,3000	1,64098	0,1324
18-19	2,7500	0,1358	0,66278	0,0788
19-20	-6,7548	0,3397	-2,74699	0,0923
10-20	9,0537	0,4600	3,66385	0,1499
10-17	5,4009	0,2819	4,58274	0,1428
10-21	15,7892	0,7845	9,98990	0,5298
10-22	7,6205	0,3769	4,58629	0,2468
21-22	-1,8220	0,1023	-1,44944	0,0557
15-23	5,0030	0,2390	2,94714	0,2224
22-24	5,7453	0,2689	3,02710	0,1794
23-24	1,7717	0,0754	1,28392	0,1351
24-25	-1,2344	0,0963	2,01711	0,0658
25-26	3,5446	0,1799	2,36667	0,1223
25-27	-4,7891	0,2762	-0,36720	0,1882
28-27	18,0955	0,9601	5,03619	0,5424
27-29	6,1900	0,3168	1,66881	0,0977
27-30	7,0920	0,3639	1,66280	0,1005
29-30	3,7037	0,1874	0,60587	0,0349
8-28	-0,5391	0,0810	-0,52080	0,5690
6-28	18,6944	0,8859	0,09199	0,0048

Tabela C.16: Perdas ativas na transmissão para FCSD

Ramo	Perdas (MW)	
	m	α
1-2	5,500330	0,56142292
1-3	2,800686	0,26239106
2-4	1,112455	0,09702415
3-4	0,768769	0,07170022
2-5	2,993129	0,22142447
2-6	2,047017	0,17570335
4-6	0,596083	0,05158613
5-7	0,158109	0,00958282
6-7	0,367538	0,02296325
6-8	0,108308	0,01154756
6-9	0,000000	0,00000000
6-10	0,000000	0,00000000
9-11	0,000000	0,00000000
9-10	0,000000	0,00000000
4-12	0,000000	0,00000000
12-13	0,000000	0,00000000
12-14	0,074247	0,00798475
12-15	0,216266	0,02337165
12-16	0,052149	0,00582486
14-15	0,005932	0,00071128
16-17	0,011156	0,00128744
15-18	0,038292	0,00421921
18-19	0,004835	0,00054811
19-20	0,017181	0,00177248
10-20	0,081732	0,00851955
10-17	0,014880	0,00137196
10-21	0,111204	0,01186585
10-22	0,052643	0,00561403
21-22	0,000589	0,00006210
15-23	0,031297	0,00361572
22-24	0,045417	0,00480231
23-24	0,005987	0,00081072
24-25	0,010098	0,00003150
25-26	0,044633	0,00488400
25-27	0,024354	0,00311819
28-27	0,000000	0,00000000
27-29	0,086240	0,00942582
27-30	0,162194	0,01776374
29-30	0,033543	0,00368364
8-28	0,001904	0,00112494
6-28	0,057928	0,00559965

C.3 Sistema IEEE57

C.3.1 Resultados para o FCNR

Tabela C.17: Magnitudes e ângulos das tensões para FCNR

Barra	Tensões (pu)	Ângulos (graus)
1	1,0400	0,0000
2	1,0100	-1,1859
3	0,9850	-5,9788
4	0,9818	-7,3281
5	0,9768	-8,5345
6	0,9800	-8,6673
7	0,9840	-7,6075
8	1,0050	-4,4881
9	0,9800	-9,6018
10	0,9860	-11,4731
11	0,9736	-10,2079
12	1,0150	-10,4891
13	0,9784	-9,8155
14	0,9694	-9,3592
15	0,9875	-7,1922
16	1,0134	-8,8717
17	1,0174	-5,4025
18	1,0099	-11,5255
19	1,0061	-13,3442
20	1,0162	-13,7723
21	1,0428	-12,8696
22	1,0056	-12,8770
23	1,0042	-12,9432
24	0,9963	-13,3045
25	0,9793	-18,2186
26	0,9562	-12,9866
27	0,9802	-11,5236
28	0,9959	-9,7857

Barra	Tensões (pu)	Ângulos (graus)
30	0,9593	-18,7699
31	0,9325	-19,4418
32	0,9466	-18,5687
33	0,9443	-18,6086
34	0,9562	-14,1787
35	0,9632	-13,9350
36	0,9729	-13,6625
37	0,9819	-13,4714
38	1,0097	-12,7525
39	0,9799	-13,5173
40	0,9699	-13,6874
41	0,9952	-14,1079
42	0,9651	-15,5600
43	1,0090	-11,3731
44	1,0142	-11,8747
45	1,0346	-9,2899
46	1,0311	-12,5417
48	1,0250	-12,6370
49	1,0345	-12,9719
50	1,0220	-13,4483
51	1,0518	-12,5648
52	0,9800	-11,5135
53	0,9706	-12,2693
54	0,9961	-11,7275
55	1,0307	-10,8198
56	0,9666	-16,0859
57	0,9628	-16,6033

Tabela C.18: Potências ativa e reativa geradas nas barras para FCNR

Barra	Potência Ativa (MW)	Potência Reativa (MVar)
1	423,8293	112,4379
2	-	-88,7629
3	-	-23,7184
6	-	-2,0690
8	-	40,3618
9	-	-22,7738
12	-	105,7504

Tabela C.19: Fluxos de potências ativa e reativa geradas nas barras para FCNR

Barra	Pot. ativa (MW)	Pot. Reativa (MVar)	Barra	Pot. ativa (MW)	Pot. Reativa (MVar)
1-2	101,9541	75,0337	7-29	60,2706	13,4272
2-3	97,6403	-4,6053	25-30	7,5648	4,6236
3-4	59,5137	-10,6919	30-31	3,8542	2,6581
4-5	13,9814	-4,0201	31-32	-2,0235	-0,3603
4-6	14,3767	-4,4872	32-33	3,8079	1,9073
6-7	-17,5378	-1,5849	34-32	7,4560	3,7981
6-8	-42,3409	-6,6082	34-35	-7,4560	-3,7981
8-9	178,2569	19,8020	35-36	-13,4952	-6,5621
9-10	17,2588	-9,0960	36-37	-17,0349	-10,5123
9-11	12,9714	2,4684	37-38	-20,9880	-13,5166
9-12	2,5533	-15,8547	37-39	3,8303	2,8494
9-13	2,3526	-1,6572	36-40	3,4358	3,9704
13-14	-10,2790	22,8951	22-38	-11,6412	-6,3915
13-15	-49,0209	4,9325	11-41	9,2133	3,6180
1-15	149,0616	34,3400	41-42	8,8943	3,3664
1-16	79,3589	-0,8708	41-43	-11,6292	-3,0579
1-17	93,4547	3,9350	38-44	-24,5833	4,4193
3-15	34,3415	-17,4354	15-45	37,5845	0,1313
4-18	17,3994	1,1647	14-46	48,2098	28,3141
4-18	17,2570	-0,7777	46-47	48,2098	26,3338
5-6	0,8497	-5,8240	47-48	17,8882	13,2453
7-8	-77,8724	-12,6773	48-49	-0,0529	-7,7651
10-12	-17,7147	-20,2534	49-50	9,4740	4,1646
11-13	-9,9196	-4,2001	50-51	-11,6061	-6,4635
12-13	-0,3888	61,2100	10-51	29,8403	12,8031
12-16	-33,5002	8,8601	13-49	32,6007	34,4878
12-17	-48,5650	9,2074	29-52	17,8956	2,5160
14-15	-69,0790	-9,9724	52-53	12,5338	-0,2829
18-19	3,5376	-1,7382	53-54	-7,5909	-4,5086
19-20	0,1674	-2,4425	54-55	-11,8463	-6,1005
21-20	2,1494	3,5934	11-43	13,6292	4,9711
21-22	-2,1494	-3,5934	44-45	-36,7604	2,4656
22-23	9,4789	2,7775	40-56	3,4270	3,9568
23-24	3,1693	0,6629	56-41	-5,4692	0,5744
24-25	6,7945	1,6679	56-42	-1,5952	1,3718
24-25	6,7945	1,6679	39-57	3,8246	2,8404
24-26	-10,7140	-1,9288	57-56	-2,8754	0,5328
26-27	-10,7140	-1,9902	38-49	-4,8666	-11,2749
27-28	-20,2283	-2,8202	38-48	-17,6318	-20,5551
28-29	-25,0966	-5,5343	9-55	18,9562	10,4247

Tabela C.20: Perdas ativas na transmissão para FCNR

Ramo	Perdas (MW)
1-2	1,313779
2-3	2,785097
3-4	0,131748
4-6	0,095726
6-7	0,064066
6-8	0,639485
8-9	3,164480
9-10	0,133180
9-11	0,048520
9-12	0,103963
9-13	0,002815
13-14	0,090216
13-15	0,685534
1-15	3,915823
1-16	2,645329
1-17	1,928430
3-15	0,233472
4-18	0,000000
4-18	0,000000
5-6	0,009423
7-8	0,890295
10-12	0,188613
11-13	0,025725
12-13	0,714848
12-16	0,213457
12-17	0,961261
14-15	0,883968
18-19	0,070221
19-20	0,016759
21-20	0,000000
21-22	0,012909
22-23	0,009552
23-24	0,018477
24-25	0,000000
24-25	0,000000
24-26	0,000000
26-27	0,214322
27-28	0,268285
28-29	0,278350
7-29	0,000000

Ramo	Perdas (MW)
25-30	0,110659
30-31	0,077645
31-32	0,024628
32-33	0,007936
34-32	0,000000
34-35	0,039203
35-36	0,103916
36-37	0,122773
37-38	0,419032
37-39	0,005649
36-40	0,008738
22-38	0,033487
11-41	0,000000
41-42	0,189026
41-43	0,000000
38-44	0,177111
15-45	0,000000
14-46	0,000000
46-47	0,621629
47-48	0,084809
48-49	0,044812
49-50	0,080166
50-51	0,234173
10-51	0,000000
13-49	0,000000
29-52	0,461858
52-53	0,124704
53-54	0,155382
54-55	0,309908
11-43	0,000000
44-45	0,824060
40-56	0,000000
56-41	0,179002
56-42	0,010068
39-57	0,000000
57-56	0,016053
38-49	0,162439
38-48	0,224445
9-55	0,000000

C.3.2 Resultados para o FCSN

Tabela C.21: Magnitudes e ângulos das tensões para FCSN

Barra	Tensões (pu)		Ângulos (graus)	
	m	α	m	α
1	1,0400	0,00000	0,0000	0,00000
2	1,0100	0,00000	-1,1859	0,18691
3	0,9850	0,00000	-5,9788	0,78029
4	0,9818	0,00057	-7,3282	0,96757
5	0,9768	0,00052	-8,5345	1,23877
6	0,9800	0,00000	-8,6673	1,35702
7	0,9840	0,00129	-7,6075	1,48135
8	1,0050	0,00000	-4,4882	1,52444
9	0,9800	0,00000	-9,6018	1,44205
10	0,9860	0,00178	-11,4732	1,33108
11	0,9736	0,00199	-10,2079	1,28425
12	1,0150	0,00000	-10,4891	1,20877
13	0,9784	0,00237	-9,8155	1,12563
14	0,9694	0,00332	-9,3592	1,01138
15	0,9875	0,00229	-7,1922	0,79175
16	1,0134	0,00217	-8,8717	0,91291
17	1,0174	0,00273	-5,4025	0,50205
18	1,0099	0,00325	-11,5255	1,13505
19	1,0061	0,00641	-13,3442	1,20214
20	1,0162	0,00742	-13,7723	1,21748
21	1,0428	0,00769	-12,8696	1,21631
22	1,0056	0,00742	-12,8770	1,21592
23	1,0042	0,00759	-12,9432	1,22610
24	0,9963	0,00911	-13,3045	1,36863
25	0,9793	0,01431	-18,2187	1,57919
26	0,9562	0,00803	-12,9866	1,37676
27	0,9802	0,00547	-11,5236	1,49456
28	0,9959	0,00409	-10,4933	1,51807
29	1,0098	0,00300	-9,7857	1,53065

Barra	Tensões (pu)		Ângulos (graus)	
	m	α	m	α
30	0,9593	0,01584	-18,7700	1,59987
31	0,9325	0,01769	-19,4418	1,61667
32	0,9466	0,01559	-18,5687	1,54201
33	0,9443	0,01579	-18,6087	1,54408
34	0,9562	0,01170	-14,1787	1,28533
35	0,9632	0,01093	-13,9351	1,27284
36	0,9729	0,00999	-13,6626	1,26019
37	0,9819	0,00926	-13,4715	1,24643
38	1,0097	0,00711	-12,7525	1,19621
39	0,9799	0,00938	-13,5174	1,25090
40	0,9699	0,01009	-13,6875	1,26711
41	0,9952	0,00591	-14,1079	1,41411
42	0,9651	0,00891	-15,5600	1,44190
43	1,0090	0,00326	-11,3731	1,32215
44	1,0142	0,00613	-11,8747	1,12150
45	1,0346	0,00289	-9,2900	0,94066
46	1,0583	0,00449	-11,1405	1,09482
47	1,0311	0,00603	-12,5418	1,17042
48	1,0250	0,00637	-12,6370	1,18437
49	1,0345	0,00592	-12,9720	1,23033
50	1,0220	0,00635	-13,4484	1,30215
51	1,0518	0,00321	-12,5649	1,35580
52	0,9800	0,00579	-11,5135	1,56630
53	0,9706	0,00677	-12,2694	1,57979
54	0,9961	0,00422	-11,7275	1,54305
55	1,0307	0,00100	-10,8198	1,49516
56	0,9666	0,00942	-16,0859	1,42969
57	0,9628	0,01005	-16,6033	1,43394

Tabela C.22: Potências ativa e reativa nas barras para o FCSN

Barra	Potência ativa(MW)		Potência Reativa (MVar)	
	m	α	m	α
1	423,8293	48,93701	112,4379	14,61484
2	-	-	-88,7629	11,14027
3	-	-	-23,7184	13,95909
6	-	-	-2,0690	4,43975
8	-	-	40,3618	1,80712
9	-	-	-22,7738	5,83635
12	-	-	105,7504	9,09145

Tabela C.23: Fluxos de potências ativa e reativa para FCSN

Ramo	P_{km} (MW)		Q_{km} (MVar)	
	m	α	m	α
1-2	101,9541	12,9670	75,03374	3,3265
2-3	97,6403	12,6877	-4,60527	3,0836
3-4	59,5137	8,6746	-10,69188	1,3522
4-5	13,9814	2,9939	-4,02010	0,8277
4-6	14,3767	4,6389	-4,48720	0,8492
6-7	-17,5378	2,0527	-1,58492	0,4597
6-8	-42,3409	1,8570	-6,60818	0,1917
8-9	178,2569	3,1367	19,80200	0,2665
9-10	17,2588	1,0625	-9,09602	0,5068
9-11	12,9714	2,8621	2,46839	0,6898
9-12	2,5533	1,5057	15,85470	0,2910
9-13	2,3526	2,1316	-1,65725	0,2983
13-14	-10,2790	1,8166	22,89507	0,2113
13-15	-49,0209	5,6086	4,93251	1,5637
1-15	149,0616	16,9297	34,34003	0,5869
1-16	79,3589	8,8562	-0,87081	0,0855
1-17	93,4547	9,0355	3,93497	0,3749
3-15	34,3415	0,2309	-17,43539	2,4480
4-18	17,3994	0,7584	1,16470	0,3773
4-18	17,2570	0,7522	-0,77774	0,3742
5-6	0,8497	2,6497	-5,82395	0,7416
7-8	-77,8724	0,9757	12,67730	1,1680
10-12	-17,7147	1,6464	-20,25339	0,5144
11-13	-9,9196	2,5789	-4,20013	0,7513
12-13	-0,3888	0,8921	61,21005	2,0928
12-16	-33,5002	6,7339	8,86009	0,2879
12-17	-48,5650	7,2111	9,20736	0,0733
14-15	-69,0790	4,9953	-9,97235	3,0306
18-19	3,5376	0,0078	-1,73817	0,1315
19-20	0,1674	0,0239	-2,44251	0,0767
21-20	2,1494	0,0155	3,59344	0,0141
21-22	-2,1494	0,0270	-3,59344	0,0187
22-23	9,4789	0,5231	2,77754	0,0183
23-24	3,1693	0,5278	0,66288	0,1484
24-25	6,7945	0,2455	1,66794	0,2692
24-25	6,7945	0,2455	1,66794	0,2692
24-26	-10,7140	0,0232	-1,92881	0,8526
26-27	-10,7140	1,3421	-1,99025	0,8255
27-28	-20,2283	0,1677	-2,82017	0,8690
28-29	-25,0966	0,2151	-5,53432	1,0139

Ramo	P_{km} (MW)		Q_{km} (MVar)	
	m	α	m	α
7-29	60,2706	1,4187	13,42724	1,6792
25-30	7,5648	0,0860	4,62364	0,3233
30-31	3,8542	0,0532	2,65806	0,1801
31-32	-2,0235	0,1921	-0,36031	0,2207
32-33	3,8079	0,1305	1,90729	0,1427
34-32	7,4560	0,3856	3,79807	0,2590
34-35	-7,4560	0,4728	-3,79807	0,6551
35-36	-13,4952	0,7778	-6,56214	1,0486
36-37	-17,0349	1,0489	10,51233	1,3152
37-38	-20,9880	1,2532	13,51664	1,6089
37-39	3,8303	0,0484	2,84936	0,0749
36-40	3,4358	0,1216	3,97035	0,0099
22-38	-11,6412	1,2605	-6,39150	1,2007
11-41	9,2133	0,3106	3,61796	0,3352
41-42	8,8943	0,0905	3,36643	0,4009
41-43	-11,6292	0,3894	-3,05787	0,4867
38-44	-24,5833	2,4571	4,41927	1,9626
15-45	37,5845	2,9568	0,13135	0,3933
14-46	48,2098	2,3883	28,31414	0,9168
46-47	48,2098	1,1077	26,33384	0,9202
47-48	17,8882	0,2169	13,24529	0,0928
48-49	-0,0529	0,8760	-7,76508	0,5192
49-50	9,4740	0,6996	4,16461	0,2715
50-51	-11,6061	0,1115	-6,46349	0,8956
10-51	29,8403	0,6934	12,80306	1,2030
13-49	32,6007	1,0924	34,48785	1,2881
29-52	17,8956	0,2404	2,51603	0,5049
52-53	12,5338	0,1461	-0,28292	0,3272
53-54	-7,5909	0,4788	-4,50856	0,6732
54-55	-11,8463	0,3318	-6,10052	0,7709
11-43	13,6292	0,4686	4,97111	0,5440
44-45	-36,7604	0,4700	2,46557	2,6065
40-56	3,4270	0,2303	3,95678	0,0339
56-41	-5,4692	0,1878	0,57437	0,3060
56-42	-1,5952	0,1928	1,37177	0,0951
39-57	3,8246	0,2195	2,84040	0,0432
57-56	-2,8754	0,0721	0,53280	0,1694
38-49	-4,8666	1,5885	11,27490	0,5395
38-48	-17,6318	0,7963	20,55506	1,1803
9-55	18,9562	0,9372	10,42465	0,5803

Tabela C.24: Perdas ativas na transmissão para FCSN

Ramo	Perdas (MW)	
	m	α
1-2	1,313779	0,14806839
2-3	2,785097	0,67965155
3-4	0,417902	0,12270474
4-5	0,131748	0,05725198
4-6	0,095726	0,05566364
6-7	0,064066	0,01485870
6-8	0,639485	0,04467276
8-9	3,164480	0,08775954
9-10	0,133180	0,01169667
9-11	0,048520	0,02357090
9-12	0,103963	0,00969702
9-13	0,002815	0,00825917
13-14	0,090216	0,02589896
13-15	0,685534	0,20138470
1-15	3,915823	0,82371735
1-16	2,645329	0,56626342
1-17	1,928430	0,37990194
3-15	0,233472	0,00399273
4-18	0,000000	0,00000000
4-18	0,000000	0,00000000
5-6	0,009423	0,00711610
7-8	0,890295	0,02133897
10-12	0,188613	0,02738575
11-13	0,025725	0,01578275
12-13	0,714848	0,06994147
12-16	0,213457	0,07760962
12-17	0,961261	0,26871629
14-15	0,883968	0,16697403
18-19	0,070221	0,00741612
19-20	0,016759	0,00089323
21-20	0,000000	0,00000000
21-22	0,012936	0,00027161
22-23	0,009552	0,00235359
23-24	0,018477	0,00990082
24-25	0,000000	0,00000000
24-25	0,000000	0,00000000
24-26	0,000000	0,00000000
26-27	0,214322	0,00959635
27-28	0,268285	0,01833710
28-29	0,278350	0,01971877

Ramo	Perdas (MW)	
	m	α
7-29	0,000000	0,00000000
25-30	0,110659	0,01026400
30-31	0,077645	0,00759133
31-32	0,024628	0,00493043
32-33	0,007936	0,00100837
34-32	0,000000	0,00000000
34-35	0,039203	0,00579775
35-36	0,103916	0,01412420
36-37	0,122773	0,02346986
37-38	0,419032	0,04966007
37-39	0,005649	0,00056528
36-40	0,008738	0,00045069
22-38	0,033487	0,00554247
11-41	0,000000	0,00000000
41-42	0,189026	0,02664782
41-43	0,000000	0,00000000
38-44	0,177111	0,03437145
15-45	0,000000	0,00000000
14-46	0,000000	0,00000000
46-47	0,621629	0,38455244
47-48	0,084809	0,00792672
48-49	0,044812	0,00088289
49-50	0,080166	0,02196247
50-51	0,234173	0,03191769
10-51	0,000000	0,00000000
13-49	0,000000	0,00000000
29-52	0,461858	0,04348968
52-53	0,124704	0,00905559
53-54	0,155382	0,02948342
54-55	0,309908	0,02598268
11-43	0,000000	0,00000000
44-45	0,824060	0,13973380
40-56	0,000000	0,00000000
56-41	0,179002	0,01810716
56-42	0,010068	0,00084592
39-57	0,000000	0,00000000
57-56	0,016053	0,00069489
38-49	0,162439	0,02119098
38-48	0,224445	0,01676449
9-55	0,000000	0,00000000

C.3.3 Resultados para o FCSD

Tabela C.25: Fluxos de potências ativa e reativa para FCSD

Ramo	P_{km} (MW)		Q_{km} (MVar)	
	m	α	m	α
1-2	101,9541	12,9670	75,03374	3,5536
2-3	97,6403	12,6877	-4,60527	3,2877
3-4	59,5137	9,3390	-10,69188	1,7466
4-5	13,9814	3,2340	-4,02010	1,4697
4-6	14,3767	4,6370	-4,48720	1,4448
6-7	-17,5378	2,4022	-1,58492	0,1968
6-8	-42,3409	1,8047	-6,60818	0,4926
8-9	178,2569	3,1367	19,80200	0,3285
9-10	17,2588	1,1200	-9,09602	0,8000
9-11	12,9714	2,9059	2,46839	2,1652
9-12	2,5533	1,5057	-15,85470	0,3064
9-13	2,3526	3,2863	-1,65725	1,8298
13-14	-10,2790	4,1744	22,89507	2,5023
13-15	-49,0209	6,5586	4,93251	2,3276
1-15	149,0616	17,5961	34,34003	0,2803
1-16	79,3589	9,1409	-0,87081	0,1463
1-17	93,4547	9,7145	3,93497	0,2849
3-15	34,3415	1,0206	-17,43539	2,1313
4-18	17,3994	0,7563	1,16470	0,4157
4-18	17,2570	0,7501	-0,77774	0,4136
5-6	0,8497	2,6486	-5,82395	1,7669
7-8	-77,8724	1,0054	-12,67730	1,2630
10-12	-17,7147	1,9924	-20,25339	0,3013
11-13	-9,9196	3,6654	-4,20013	1,4458
12-13	-0,3888	1,8991	61,21005	2,9966
12-16	-33,5002	6,7186	8,86009	3,2533
12-17	-48,5650	7,3263	9,20736	3,2311
14-15	-69,0790	6,9989	-9,97235	1,4923
18-19	3,5376	0,2451	-1,73817	0,1071
19-20	0,1674	0,1064	-2,44251	0,0735
21-20	2,1494	0,0149	3,59344	0,0358
21-22	-2,1494	0,0151	-3,59344	0,0358
22-23	9,4789	1,1758	2,77754	0,1703
23-24	3,1693	0,9209	0,66288	0,2579
24-25	6,7945	0,2404	1,66794	0,2586
24-25	6,7945	0,2404	1,66794	0,2586
24-26	-10,7140	0,4217	-1,92881	0,8074
26-27	-10,7140	0,4217	-1,99025	0,8050
27-28	-20,2283	0,0571	-2,82017	0,8120
28-29	-25,0966	0,1305	-5,53432	0,9091

Ramo	P_{km} (MW)		Q_{km} (MVar)	
	m	α	m	α
7-29	60,2706	1,4143	13,42724	1,5474
25-30	7,5648	0,2377	4,62364	0,1874
30-31	3,8542	0,0840	2,65806	0,1012
31-32	-2,0235	0,1544	-0,36031	0,0237
32-33	3,8079	0,1532	1,90729	0,0769
34-32	7,4560	0,3761	3,79807	0,2210
34-35	-7,4560	0,3760	-3,79807	0,2210
35-36	-13,4952	0,6213	-6,56214	0,3523
36-37	-17,0349	0,8595	-10,51233	0,3019
37-38	-20,9880	1,0882	-13,51664	0,3363
37-39	3,8303	0,2164	2,84936	0,0188
36-40	3,4358	0,2269	3,97035	0,0663
22-38	-11,6412	1,1607	-6,39150	0,2064
11-41	9,2133	0,3088	3,61796	0,3172
41-42	8,8943	0,2690	3,36643	0,3019
41-43	-11,6292	0,3866	-3,05787	0,3364
38-44	-24,5833	2,2991	4,41927	0,2347
15-45	37,5845	2,9459	0,13135	0,3914
14-46	48,2098	2,3752	28,31414	0,7010
46-47	48,2098	2,3752	26,33384	0,5230
47-48	17,8882	1,1282	13,24529	0,1090
48-49	-0,0529	0,4297	-7,76508	0,4513
49-50	9,4740	0,8985	4,16461	0,3852
50-51	-11,6061	0,0453	-6,46349	0,8236
10-51	29,8403	0,6910	12,80306	1,1045
13-49	32,6007	1,0857	34,48785	1,0886
29-52	17,8956	0,5937	2,51603	0,3860
52-53	12,5338	0,3628	-0,28292	0,2532
53-54	-7,5909	0,4473	-4,50856	0,2056
54-55	-11,8463	0,6302	-6,10052	0,2845
11-43	13,6292	0,4668	4,97111	0,4529
44-45	-36,7604	2,8144	2,46557	0,0919
40-56	3,4270	0,2265	3,95678	0,0670
56-41	-5,4692	0,1623	0,57437	0,1609
56-42	-1,5952	0,0305	1,37177	0,1002
39-57	3,8246	0,2159	2,84040	0,0180
57-56	-2,8754	0,0529	0,53280	0,0894
38-49	-4,8666	0,1207	-11,27490	0,4060
38-48	-17,6318	0,6785	-20,55506	0,3131
9-55	18,9562	0,9366	10,42465	0,5162

Tabela C.26: Potências ativa e reativa geradas nas barras para o FCSD

Barra	Potência ativa(MW)		Potência Reativa (MVar)	
	m	α	m	α
1	423,8293	49,41863	112,4379	2,94150
2	-	-	-88,7629	0,79946
3	-	-	-23,7184	5,73936
6	-	-	-2,0690	3,15020
8	-	-	40,3618	1,73144
9	-	-	-22,7738	4,73810
12	-	-	105,7504	9,54087

Tabela C.27: Perdas ativas na transmissão para FCSD

Ramo	Perdas (MW)	
	m	α
1-2	1,313779	0,15817514
2-3	2,785097	0,72462876
3-4	0,417902	0,13187761
4-5	0,131748	0,06400152
4-6	0,095726	0,06315586
6-7	0,064066	0,01757006
6-8	0,639485	0,05243025
8-9	3,164480	0,10815633
9-10	0,133180	0,01915264
9-11	0,048520	0,01617385
9-12	0,103963	0,01021017
9-13	0,002815	0,01240632
13-14	0,090216	0,02820743
13-15	0,685534	0,19037359
1-15	3,915823	0,86676493
1-16	2,645329	0,60893513
1-17	1,928430	0,40013457
3-15	0,233472	0,00161568
4-18	0,000000	0,00000000
4-18	0,000000	0,00000000
5-6	0,009423	0,00771393
7-8	0,890295	0,01687731
10-12	0,188613	0,02373920
11-13	0,025725	0,01489164
12-13	0,714848	0,06685365
12-16	0,213457	0,08995225
12-17	0,961261	0,30313886
14-15	0,883968	0,17429041
18-19	0,070221	0,00641342
19-20	0,016759	0,00078212
21-20	0,000000	0,00000000
21-22	0,012716	0,00026050
22-23	0,009552	0,00216708
23-24	0,018477	0,00879071
24-25	0,000000	0,00000000
24-25	0,000000	0,00000000
24-26	0,000000	0,00000000
26-27	0,214322	0,00848524
27-28	0,268285	0,00317375
28-29	0,278350	0,00831013

Ramo	Perdas (MW)	
	m	α
7-29	0,000000	0,00000000
25-30	0,110659	0,00935399
30-31	0,077645	0,00566748
31-32	0,024628	0,00426940
32-33	0,007936	0,00078853
34-32	0,000000	0,00000000
34-35	0,039203	0,00466359
35-36	0,103916	0,01124611
36-37	0,122773	0,01235875
37-38	0,419032	0,04146824
37-39	0,005649	0,00049812
36-40	0,008738	0,00042959
22-38	0,033487	0,00490733
11-41	0,000000	0,00000000
41-42	0,189026	0,01553671
41-43	0,000000	0,00000000
38-44	0,177111	0,03403683
15-45	0,000000	0,00000000
14-46	0,000000	0,00000000
46-47	0,621629	0,05571999
47-48	0,084809	0,00698029
48-49	0,044812	0,00568152
49-50	0,080166	0,01085136
50-51	0,234173	0,01439477
10-51	0,000000	0,00000000
13-49	0,000000	0,00000000
29-52	0,461858	0,03436871
52-53	0,124704	0,00794448
53-54	0,155382	0,01847231
54-55	0,309908	0,03362319
11-43	0,000000	0,00000000
44-45	0,824060	0,13144631
40-56	0,000000	0,00000000
56-41	0,179002	0,01141351
56-42	0,010068	0,00073481
39-57	0,000000	0,00000000
57-56	0,016053	0,00058377
38-49	0,162439	0,01008987
38-48	0,224445	0,01307076
9-55	0,000000	0,00000000

