

Este exemplar corresponde à redação final da tese
defendida por Marcelo Murad Pereira
Lima e aprovada pela Comissão
Julgada em 17 / 04 / 2000
Carlos Alberto Favari
Orientador



Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
Departamento de Sistemas de Energia Elétrica

Nova Concepção para Fluxo de Carga *Fuzzy* Incorporando Função de Pertinência Sinusoidal

Marcelo Murad Pereira Lima
Aluno

Prof. Dr. Carlos Alberto Favari 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 Favari Murari – UNICAMP/FEEC
Prof. Dr. Djalma Mosqueira Falcão – UFRJ/COPPE
Prof. Dr. Christiano Lyra Filho – UNICAMP/FEEC

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

17 de abril de 2000



2000 13513

UNIDADE B C
 1.ª CHAMADA:
T/UNICAMP
L628n
 Ex.
 OMBO BC/ 42264
 ROC. 16-278100
 C ☐ D ☒
 REC. RS 11,00
 ATA 22109100
 2.ª CPD

CM-00145883-1

113 10 276977

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

L628n Lima, Marcelo Murad Pereira
 Nova concepção para fluxo de carga fuzzy
 incorporando função de pertinência sinusoidal /
 Marcelo Murad Pereira Lima.--Campinas, SP: [s.n.],
 2000.

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

1. Teoria dos conjuntos. 2. Aritmética nebulosa.
 3. Sistemas de energia elétrica. I. Murari, Carlos
 Alberto Favarin. II. Universidade Estadual de
 Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de
 Computação. III. Título.

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

À minha mãe, que sempre me apoiou e esteve ao meu lado nos momentos mais difíceis e decisivos da minha vida e à memória de meu pai.

Resumo

Este trabalho apresenta uma nova metodologia, que utiliza função de pertinência trapezoidal, para a simulação de fluxo de carga *fuzzy*. O objetivo deste tipo de fluxo de carga é o de fornecer resultados que considerem as imprecisões nas potências que fazem parte dos bancos de dados dos sistemas de energia elétrica.

Diferindo de abordagens *fuzzy* anteriores, as quais utilizam funções trapezoidais para representar os números nebulosos e efetuar os cálculos das magnitudes e ângulos das tensões, fluxos, potências geradas e perdas, os algoritmos de fluxo de carga aqui propostos utilizam a função de pertinência em forma de sino (sinusoidal) para tal representação. Com o uso desta função não é necessário utilizar técnicas como cortes de nível (α -cuts) e linearização para formular a metodologia para a simulação do fluxo de carga *fuzzy* além desta possuir seus próprios operadores para executar os cálculos, simplificando e facilitando o entendimento destes.

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

Abstract

This work shows a new methodology to simulate fuzzy load flow. The main objective of this load flow is to get results which consider the vagueness in the power system's variables.

The technique developed in this work uses the bell shape function instead of the more common trapezoidal function to represent fuzzy numbers and simulate a fuzzy load flow. The bell shape function doesn't require additional techniques like α -cuts and linearization to execute a fuzzy load flow because this function has proper operators.

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

Agradecimentos

Aos amigos do Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica e do Departamento de Sistemas de Energia Elétrica, pela ajuda, paciência e companheirismo. A Miriam pela ajuda com os computadores e impressoras.

Ao Marcelo Adorni e ao Fernando Diniz pelo auxílio com os conjuntos nebulosos.

Ao Walmir, Heder e Haffner pelo auxílio com o MatLab e o LaTeX.

Aos amigos, Adriana, André, Monica, Flavia, Fernando e a minha namorada Larissa, que sempre me incentivaram e suportaram os momentos de chatice.

Aos professores da UNICAMP com quem tive oportunidade de trabalhar e aprender muito.

Aos professores da UNESP/Bauru que me impulsionaram para mais este degrau da minha vida pessoal e profissional.

Um agradecimento especial ao professor Carlos Alberto F. Murari, pela orientação e auxílio constante durante o desenvolvimento deste trabalho.

E à CAPES pelo apoio financeiro.

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

Sumário

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE ⁱ

Resumo	i
Abstract	iii
Agradecimentos	v
1 Introdução	1
2 Fundamentação Teórica	3
2.1 Definições	3
2.1.1 Função de pertinência	3
2.1.2 Conjunto nebuloso	8
2.1.3 Cortes de nível (α -cuts)	9
2.2 Teoria de possibilidades	10
2.3 Aritmética intervalar	10
2.3.1 Operações com intervalos	10
2.4 Cosseno e seno nebuloso	14
3 Fluxo de Carga Newton <i>Fuzzy</i>	17
3.1 FCN - Fluxo de Carga Newton Convencional	17
3.2 FCNT - Fluxo de Carga Newton <i>Fuzzy</i> Trapezoidal	21
3.3 FCNS - Fluxo de Carga Newton <i>Fuzzy</i> Sinusoidal	25
3.3.1 Metodologia utilizando os operadores nebulosos	26
3.3.2 Metodologia discreta	29
4 Fluxo de Carga Linearizado <i>Fuzzy</i>	33
4.1 FCL - Método Convencional	33
4.2 FCLT - Fluxo de Carga Linearizado <i>Fuzzy</i> Trapezoidal	38

SUMÁRIO

4.3	FCLS - Fluxo de Carga Linearizado <i>Fuzzy</i> Sinusoidal	41
5	Resolução de um exemplo prático	45
5.1	Sistema utilizado	45
5.2	Resolução pelo Fluxo de Carga Linearizado	46
5.2.1	FCL - Método Convencional	46
5.2.2	FCLT - Fluxo de Carga Linearizado <i>Fuzzy</i> Trapezoidal	48
5.2.3	FCLS - Fluxo de Carga Linearizado <i>Fuzzy</i> Sinusoidal	51
5.3	Resolução pelo Fluxo de Carga Newton	54
5.3.1	FCN - Fluxo de Carga Newton Convencional	54
5.3.2	FCNT - Fluxo de Carga Newton <i>Fuzzy</i> Trapezoidal	57
5.3.3	FCNS - Fluxo de Carga Newton <i>Fuzzy</i> Sinusoidal	62
5.3.4	Metodologia discreta	64
6	Resultados e comentários	69
6.1	Dados de entrada nebulosos	69
6.2	Banco de dados	69
6.3	Forma de comparação	71
6.4	Convenções utilizadas e erro	71
6.4.1	Convenção utilizada para o FCL	71
6.4.2	Convenção utilizada para o FCN	72
6.4.3	Erro	72
6.5	Resultados para os fluxos linearizados	73
6.5.1	Resultados obtidos para o sistema IEEE30	73
6.5.2	Resultados obtidos para o sistema de Oporto	77
6.6	Resultados para os fluxos Newton	80
6.6.1	Resultados obtidos para o sistema IEEE30	80
6.6.2	Resultados obtidos para o sistema IEEE57	88
6.7	Resultados obtidos com o FCNS discreto (FCNSdis)	95
6.7.1	Resultados obtidos para o sistema IEEE30	95
6.7.2	Resultados obtidos para o sistema IEEE57	98
6.8	Resultados para parte do sistema constante	102
6.8.1	Resultados obtidos para o sistema IEEE30 parcial	102
7	Conclusões e aplicações	111
7.1	Proposta para o FCLS	112
7.1.1	Planejamento da expansão	112

7.2	Propostas para o FCNS	113
7.2.1	Permite traduzir resultados numéricos em lingüísticos	113
7.2.2	Possibilidade de utilização para o planejamento da expansão	114
7.2.3	Estabelecer perfis para as variáveis utilizadas na operação dos sistemas	114
7.2.4	Controle automático utilizando lógica nebulosa	115
A	Modelo de transformador utilizado	119
B	Dados do sistema de treze barras de Oporto	121
C	Resultados completos para o IEEE30 utilizando os fluxos linearizados	123
D	Resultados completos para o IEEE30 utilizando o FCN convencional	129
E	Resultados completos para o IEEE30 utilizando o FCNT	141
F	Resultados completos para o IEEE30 utilizando o FCNS	149
G	Resultados completos para o IEEE30 utilizando o FCNS discreto	157

SUMÁRIO

Lista de Figuras

2.1	Função para representação do conceito alto	4
2.2	Função trapezoidal para representar um número nebuloso	5
2.3	Função sinusoidal	6
2.4	Representação de um corte de nível	9
2.5	Potência ativa (p.u.) na forma trapezoidal	13
2.6	Distribuição de possibilidades para os desvios (p.u.)	13
3.1	Função sinusoidal	26
4.1	Função trapezoidal para a representação de um número nebuloso	38
4.2	Função em forma de sino (sinusoidal)	42
5.1	Sistema utilizado	46
7.1	Previsão para o aumento da potência na barra k, com o passar dos anos . . .	113
7.2	Exemplo de interpretação dos resultados	114
A.1	Modelo de transformador utilizado no programa	119

LISTA DE FIGURAS

Lista de Tabelas

5.1	Dados de barra do sistema	45
5.2	Dados dos ramos do sistema	45
5.3	Perdas ativas na transmissão (p.u.)	47
5.4	Novas potências ativas nas barras (p.u.)	47
5.5	Fluxos de potência ativa nos ramos (p.u.)	48
5.6	Distribuições de possibilidades (forma trapezoidal) para potência ativa (p.u.)	48
5.7	Distribuições de possibilidades (forma trapezoidal) para potência reativa (p.u.)	48
5.8	Fluxos de potência ativa nos ramos (p.u.)	49
5.9	Desvios de potência ativa (p.u.)	50
5.10	Desvios para os ângulos (rad)	50
5.11	Ângulos (rad) nas barras	50
5.12	Desvios para o fluxo ativo (p.u.)	51
5.13	Fluxo ativo (p.u.) nos ramos	51
5.14	Distribuições de possibilidades (sinusoidal) para potência ativa (p.u.)	52
5.15	Distribuições de possibilidades (sinusoidal) para potência reativa (p.u.) . . .	52
5.16	Ângulos (rad) nas barras	53
5.17	Perdas ativas (p.u.) nos ramos	53
5.18	Ângulos (rad) finais nas barras	53
5.19	Fluxo ativo (p.u.) nos ramos	54
5.20	Correção para ângulos e magnitudes das tensões	56
5.21	Ângulos e magnitudes das tensões	56
5.22	Correção para ângulos e magnitudes das tensões	57
5.23	Ângulos e magnitudes das tensões	57
5.24	Potências ativa e reativa (p.u.)	57
5.25	Fluxos de potência ativa e reativa e perdas na transmissão (p.u.)	58
5.26	Desvios das potências (p.u.)	58
5.27	Desvios para as magnitudes e os ângulos das tensões nas barras	59

LISTA DE TABELAS

5.28	Magnitudes e ângulos das tensões nas barras	59
5.29	Desvios para os fluxos ativo e reativo (p.u.)	60
5.30	Fluxos ativo e reativo (p.u.) nos ramos	60
5.31	Desvios para as potências ativa e reativa (p.u.) (barras PV e referência) . . .	60
5.32	Potências ativa e reativa (p.u.) (barras PV e de referência)	61
5.33	Perdas na transmissão (p.u.)	61
5.34	Resultados para tensões e ângulos com o FCN	62
5.35	Desvios para magnitudes e ângulos das tensões para o FCNF	63
5.36	Tensões e ângulos nas barras para o FCNS	63
5.37	Fluxo ativo (p.u.) nos ramos	63
5.38	Fluxo reativo (p.u.) nos ramos	64
5.39	Potências ativa e reativa (p.u.) geradas nas barras	64
5.40	Perdas na transmissão (p.u.)	64
5.41	Vetores dos desvios (p.u.)	65
5.42	Indicadores para as magnitudes e ângulos das tensões	65
5.43	Magnitudes e ângulos das tensões nas barras para o FCNS	66
5.44	Fluxo ativo (p.u.) mínimos e máximos nos ramos	66
5.45	Fluxo reativo (p.u.) mínimos e máximos nos ramos	66
5.46	Potências ativa e reativa (p.u.) mínimas e máximas nas barras	67
5.47	Perdas (p.u.) mínimas e máximas na transmissão	67
5.48	Fluxo ativo (p.u.) nos ramos	67
5.49	Fluxo reativo (p.u.) nos ramos	68
5.50	Perdas na transmissão (p.u.)	68
5.51	Potências ativa e reativa (p.u.) nas barras	68
6.1	Ângulos (graus) para o IEEE30	73
6.2	Erros (%) dos ângulos com relação ao FCL	74
6.3	Fluxo ativo (MW) para o IEEE30	75
6.4	Erros (%) para o fluxo ativo	75
6.5	Potência ativa (MW) e erro (%) para o IEEE30	76
6.6	Perdas ativas na transmissão (MW) e erro (%) para o IEEE30	76
6.7	Ângulos (graus) para o sistema de Oporto	77
6.8	Erros (%) para os ângulos com relação ao FCL	78
6.9	Fluxo ativo (MW) para o sistema de Oporto	78
6.10	Erros (%) para o fluxo ativo	79
6.11	Potência ativa (MW) e erro (%) para o sistema de Oporto	79

6.12 Perdas ativas (MW) na transmissão e erro (%) para o sistema de Oporto . .	79
6.13 Tensões (p.u.) para o IEEE30	80
6.14 Erros (%) das tensões	81
6.15 Ângulos (graus) para o IEEE30	82
6.16 Erros (%) dos ângulos com relação ao FCN	82
6.17 Fluxo ativo (MW) para o IEEE30	83
6.18 Erros (%) do fluxo ativo	83
6.19 Fluxo reativo (MVar) para o IEEE30	84
6.20 Erros (%) do fluxo reativo	85
6.21 Potência ativa (MW) para o IEEE30	85
6.22 Erros (%) da potência ativa	85
6.23 Potência reativa (MVar) para o IEEE30	86
6.24 Erros (%) da potência reativa	86
6.25 Perdas ativas na transmissão (MW) para o IEEE30	87
6.26 Erros (%) das perdas ativas na transmissão	87
6.27 Magnitude das tensões (p.u.) para o IEEE57	88
6.28 Erros (%) das magnitudes das tensões	89
6.29 Ângulos (graus) para o IEEE57	90
6.30 Erros (%) dos ângulos	91
6.31 Fluxo ativo (MW) para o IEEE57	91
6.32 Erros (%) do fluxo ativo	92
6.33 Fluxo reativo (MVar) para o IEEE57	92
6.34 Erros (%) do fluxo reativo	93
6.35 Potência ativa (MW) para o IEEE57	93
6.36 Erros (%) para potência ativa	93
6.37 Potência reativa (MVar) para o IEEE57	93
6.38 Erros (%) para potência reativa	94
6.39 Perdas ativas na transmissão (MW) para o IEEE57	94
6.40 Erros (%) das perdas ativas na transmissão	95
6.41 Fluxo ativo (MW) e erro para o IEEE30 obtido com o FCNSdis	96
6.42 Fluxo reativo (MVar) e erro para o IEEE30 obtido com o FCNSdis	97
6.43 Potência ativa (MW) e erro para o IEEE30 obtido com o FCNSdis	97
6.44 Potência reativa (MVar) e erro para o IEEE30 obtido com o FCNSdis	98
6.45 Perdas ativas na transmissão (MW) e erro para o IEEE30 obtidos com o FCNSdis	99
6.46 Fluxo ativo (MW) e erro para o IEEE57 obtido com o FCNSdis	99
6.47 Fluxo reativo (MVar) e erro para o IEEE57 obtido com o FCNSdis	100

LISTA DE TABELAS

6.48	Potência ativa (MW) e erro para o IEEE57 obtido com o FCNSdis	100
6.49	Potência reativa (MVar) e erro para o IEEE57 obtido com o FCNSdis	101
6.50	Perdas ativas na transmissão (MW) e erro para o IEEE57 obtidos com o FCNSdis	101
6.51	Magnitude das tensões (p.u.) para o IEEE30	103
6.52	Erros (%) para as magnitudes das tensões	103
6.53	Ângulos (graus) para o IEEE30	104
6.54	Erros (%) para os ângulos	105
6.55	Fluxo ativo (MW) para o IEEE30	105
6.56	Erros (%) para o fluxo ativo	106
6.57	Fluxo reativo (MVar) para o IEEE30	107
6.58	Erros (%) para o fluxo reativo	107
6.59	Potência ativa (MW) para o IEEE30	107
6.60	Erros (%) para a potência ativa	108
6.61	Potência reativa (MVar) para o IEEE30	108
6.62	Erros (%) para a potência reativa	108
6.63	Perdas ativas na transmissão (MW) para o IEEE30	109
6.64	Erros (%) para as perdas ativas na transmissão	109
7.1	Número de <i>flops</i> necessários para simular o IEEE30	112
B.1	Distribuições de possibilidade para potência ativa do sistema de Oporto . . .	121
B.2	Distribuições de possibilidade para potência reativa do sistema de Oporto . .	122
B.3	Dados dos ramos para o sistema de Oporto	122
C.1	Ângulos para o FCL convencional	124
C.2	Potência gerada na barra de referência para o FCL convencional	124
C.3	Fluxo ativo nos ramos para o FCL convencional	125
C.4	Perdas ativas na transmissão para o FCL convencional	125
C.5	Ângulos para o FCLT	126
C.6	Fluxo ativo nos ramos para o FCLT	126
C.7	Ângulos para o FCLS	127
C.8	Potência gerada na barra de referência para o FCLS	127
C.9	Fluxo ativo nos ramos para o FCLS	127
C.10	Perdas ativas na transmissão para o FCLS	128
D.1	Magnitudes das tensões para o FCN convencional - sistema completo	130
D.2	Ângulos para o FCN convencional - sistema completo	131
D.3	Potência ativa gerada para o FCN convencional - sistema completo	131

D.4	Potência reativa gerada para o FCN convencional - sistema completo	131
D.5	Fluxo de potência ativa para o FCN convencional - sistema completo	132
D.6	Fluxo de potência reativa para o FCN convencional - sistema completo	133
D.7	Perdas ativas na transmissão para o FCN convencional - sistema completo	134
D.8	Magnitudes das tensões para o FCN convencional - sistema parcial	135
D.9	Ângulos para o FCN convencional - sistema parcial	136
D.10	Potência ativa gerada para o FCN convencional - sistema parcial	136
D.11	Potência reativa gerada para o FCN convencional - sistema parcial	136
D.12	Fluxo de potência ativa para o FCN convencional - sistema parcial	137
D.13	Fluxo de potência reativa para o FCN convencional - sistema parcial	138
D.14	Perdas ativas na transmissão para o FCN convencional - sistema parcial	139
E.1	Magnitudes das tensões para o FCNT - sistema completo	142
E.2	Ângulos para o FCNT - sistema completo	142
E.3	Potência ativa gerada para o FCNT - sistema completo	142
E.4	Potência reativa gerada para o FCNT - sistema completo	143
E.5	Fluxo de potência ativa para o FCNT - sistema completo	143
E.6	Fluxo de potência reativa para o FCNT - sistema completo	144
E.7	Perdas ativas na transmissão para o FCNT - sistema completo	144
E.8	Magnitudes das tensões para o FCNT - sistema parcial	145
E.9	Ângulos para o FCNT - sistema parcial	145
E.10	Potência ativa gerada para o FCNT - sistema parcial	145
E.11	Potência reativa gerada para o FCNT - sistema parcial	146
E.12	Fluxo de potência ativa para o FCNT - sistema parcial	146
E.13	Fluxo de potência reativa para o FCNT - sistema parcial	147
E.14	Perdas ativas na transmissão para o FCNT - sistema parcial	147
F.1	Ângulos e magnitudes das tensões para o FCNS - sistema completo	151
F.2	Ângulos e magnitudes das tensões para o FCNS - sistema completo	151
F.3	Potência ativa gerada para o FCNS - sistema completo	151
F.4	Potência reativa gerada para o FCNS - sistema completo	152
F.5	Fluxo de potência ativa para o FCNS - sistema completo	152
F.6	Fluxo de potência reativa para o FCNS - sistema completo	153
F.7	Perdas ativas na transmissão para o FCNS - sistema completo	153
F.8	Ângulos e Magnitudes das tensões para o FCNS - sistema parcial	154
F.9	Ângulos e magnitudes das tensões para o FCNS - sistema parcial	154
F.10	Potência ativa gerada para o FCNS - sistema parcial	154

LISTA DE TABELAS

F.11 Potência reativa gerada para o FCNS - sistema parcial	155
F.12 Fluxo de potência ativa para o FCNS - sistema parcial	155
F.13 Fluxo de potência reativa para o FCNS - sistema parcial	156
F.14 Perdas ativas na transmissão para o FCNS - sistema parcial	156
G.1 Potência ativa gerada para o FCNSdis	159
G.2 Potência reativa gerada para o FCNSdis	159
G.3 Fluxo de potência ativa para o FCNSdis	159
G.4 Fluxo de potência reativa para o FCNSdis	160
G.5 Perdas ativas na transmissão para o FCNSdis	160

Capítulo 1

Introdução

Com o desenvolvimento das técnicas de cálculo de fluxo de potência em redes de energia elétrica, conhecido como fluxo de carga, criou-se uma ferramenta muito importante para a análise da operação e do planejamento dos sistemas elétricos de potência.

Desde o seu desenvolvimento, esta ferramenta sofreu modificações, melhorias e adequações, dependendo da aplicação que a utilize, destacando-se o fluxo de carga linearizado, útil no planejamento da expansão de redes e para o qual é apresentada uma versão *fuzzy*, neste trabalho.

Para efetuar as simulações com o fluxo de carga, necessita-se dos dados do sistema para o qual se deseja estimar tensões, fluxos de potência, potências geradas e perdas. Alguns destes dados são estimados com maior facilidade, como por exemplo as impedâncias das linhas de transmissão que dependem principalmente do material que são constituídas e do seu comprimento. Estes elementos não apresentam um grande grau de imprecisão em comparação com os referentes às potências nas barras, já que estas podem variar dependendo de períodos, como em um sistema de distribuição onde as potências consumidas variam de acordo com o horário do dia.

Mesmo existindo estas imprecisões, utilizando a experiência e julgamento dos engenheiros, são feitas estimativas e assim os dados dos sistemas são considerados constantes, na maioria das simulações de fluxos de carga.

Em 1965, Lofti Zadeh desenvolveu a teoria de Conjuntos Nebulosos (*Fuzzy Sets*) e em 1978, a Teoria de Possibilidades, criando uma base teórica que permite introduzir no fluxo de carga as imprecisões presentes nos sistemas elétricos de potência e também afirmações do tipo “*o fluxo de potência naquela linha está alto*”, que não sendo nem determinísticas nem probabilísticas, não podiam ter, claramente, a mesma interpretação por diferentes pessoas.

A teoria de conjuntos nebulosos tem sido utilizada em muitas áreas do conhecimento

humano há um tempo maior que especificamente na área de sistemas de potência. Portanto são poucas as publicações sobre Fluxo de Carga *Fuzzy*.

Algumas publicações encontradas, como em [Miranda et al., 1994] e [Kenarangui e Seifi, 1994], utilizam as ferramentas desenvolvidas por Zadeh para elaborar fluxos de carga *fuzzy* para sistemas de transmissão e em [Das et al., 1999] e [Miranda e Matos, 1989] são apresentados algoritmos *fuzzy* para sistemas de distribuição.

Em [Miranda et al., 1994], método implementado no desenvolvimento deste trabalho para fins de comparação de resultados, são introduzidas técnicas de linearização e cortes de nível (α -cuts) combinadas com a aritmética intervalar, para elaborar um fluxo de carga *fuzzy* que trabalha com função de pertinência trapezoidal para representar os números nebulosos.

Em [Kenarangui e Seifi, 1994] é utilizada uma função de pertinência semelhante à trapezoidal, mas que necessita de seis valores para ser definida e não quatro como na trapezoidal convencional. Utilizando também a técnica de cortes de nível para simular o fluxo de carga *fuzzy*.

Já em [Das et al., 1999] é mostrado um modelo *fuzzy* para a operação de sistemas de distribuição. Neste artigo é proposto um índice de estabilidade de tensão, também representado na forma nebulosa, que indica qual o nó mais susceptível a colapsos de tensão. A função de pertinência utilizada é a trapezoidal.

No artigo [Miranda e Matos, 1989] são apresentados uma modelagem *fuzzy* para os sistemas de potência. É descrito um procedimento operacional para obter diagramas nebulosos a partir de diferentes tipos de consumo de energia e utilizando a função trapezoidal; e as formulações para o Fluxo de Carga Linearizado e o Fluxo de Carga Newton, ambos na versão *fuzzy* para o planejamento de redes elétricas.

Também utilizando a função trapezoidal, Miranda e Saraiva [1992] propõem uma modelagem *fuzzy* para o Fluxo de Carga Ótimo, envolvendo um Fluxo de Carga Linearizado *Fuzzy*, programação linear, técnicas de decomposição e método *Dual Simplex*. São obtidas as distribuições de possibilidades para as variáveis do sistema e a possibilidade de algumas análises de risco.

Como uma nova proposta para inserir as imprecisões nos modelos dos fluxos de carga, os métodos desenvolvidos neste trabalho utilizam a função de pertinência em forma de sino (sinusoidal) para representar os números nebulosos.

Com a utilização desta função não é necessário utilizar as técnicas de cortes de nível e linearização, já que os cálculos nebulosos com esta função são efetuados com os operadores desenvolvidos para esta função, que serão descritos no decorrer do trabalho.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

Apesar da teoria de conjuntos nebulosos (*fuzzy sets*) não ser tão recente [Zadeh, 1965], a sua aplicação na análise de sistemas elétricos de energia é relativamente recente e de certa forma desconhecida por aqueles que atuam neste setor. Nesse sentido, julgou-se oportuno incluir este capítulo contendo, de forma sucinta, conceitos/definições dessa teoria e também da aritmética intervalar, utilizadas no decorrer desta dissertação.

2.1 Definições

2.1.1 Função de pertinência

Uma função de pertinência $\mu_A(x)$ é a função que estabelece a relação entre o elemento x ($x \in X$) e o conjunto nebuloso A .

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

Para o conjunto A do universo X pode-se escrever:

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

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

Esta função será utilizada para a representação da informação imprecisa, como por exemplo para definir o conceito de ser humano alto (figura 2.1).

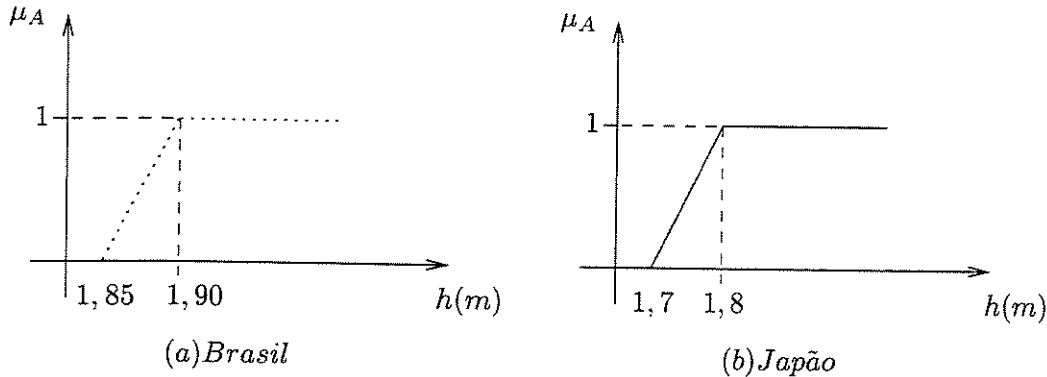


Figura 2.1: Função para representação do conceito alto

Como pode ser visto nos gráficos, um ponto interessante a destacar é que o conceito alto para o Brasil e Japão são distintos. E certamente, este conceito será diferente para diferentes países ou diferentes regiões de um mesmo país, ou até mesmo com o passar do tempo. Com isto, pode-se com a mesma ferramenta, representar um mesmo conceito (alto) de diferentes maneiras (dependendo das condições estabelecidas), ou seja, não é necessário adequar as condições de alto para o Brasil a uma função preestabelecida para o conceito alto, mas sim cria-se esta função para as condições que se deseja.

Através deste conceito é possível representar as tensões, potências e as outras variáveis do sistema, com a sua própria função, não existindo a necessidade de adequar o valor da potência obtida para uma barra a uma função previamente estabelecida, tornando-se assim, este tipo de representação, uma ferramenta poderosa.

As funções de pertinência podem ser representadas através de vários tipos de funções gráficas: triangular, trapezoidal, exponencial, e outras. A escolha do tipo da função depende da aplicação na qual ela será utilizada. Neste estudo, são utilizadas a trapezoidal e a sinusoidal (forma de sino) descritas a seguir.

2.1.1.1 Função de pertinência trapezoidal

Esta função foi utilizada em [Miranda et al., 1994] para representar as gerações e as cargas nos dados de barras e também para obter os resultados do fluxo de carga: tensões (magnitudes e ângulos), fluxos ativo e reativo nos ramos, perdas na transmissão e potências geradas nas barras.

Ela necessita de no mínimo quatro valores numéricos para ser definida (figura 2.2). As operações com esta função são em sua maioria feitas com a técnica de cortes de nível (α -cuts)

e aritmética intervalar.

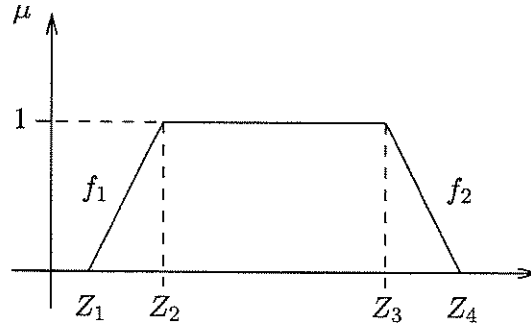


Figura 2.2: Função trapezoidal para representar um número nebuloso

Como se pode notar pela figura, esta forma de representação considera que mais de um ponto pode ter o grau de pertinência máximo ($\mu(x) = 1$). Tomando-se uma classe A qualquer, ela pode ser descrita como:

$$A = \begin{cases} 0 & \text{se } Z \leq Z_1 \\ f_1 & \text{se } Z_1 < Z < Z_2 \\ 1 & \text{se } Z_2 \leq Z \leq Z_3 \\ f_2 & \text{se } Z_3 < Z < Z_4 \\ 0 & \text{se } Z \geq Z_4 \end{cases}$$

onde f_1 é a função que representa o segmento ascendente do trapézio e f_2 o segmento descendente.

2.1.1.2 Função de pertinência sinusoidal

A função sinusoidal, utilizada em [Pereira e Murari, 1999], está representada na figura 2.3.

Em (2.1) tem-se a equação que rege esta função.

$$A(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x - m_A}{\alpha_A}\right)^2} \quad (2.1)$$

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 $A(m_A + \alpha_A) = A(m_A - \alpha_A) = 0,5$

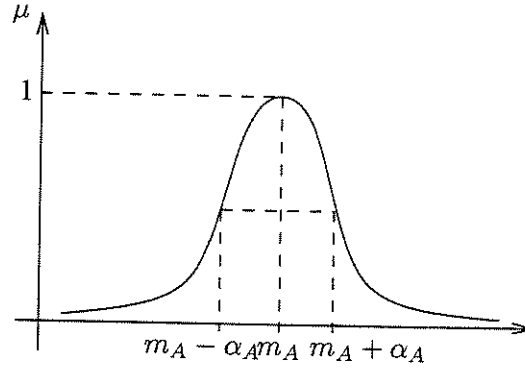


Figura 2.3: Função sinusoidal

Por necessitar de apenas dois valores para ser definida, m_A e α_A , a função sinusoidal permite uma maior facilidade no momento de se executar os cálculos e também maior simplicidade no entendimento destes.

Considerando dois números nebulosos representados por $A(m_A, \alpha_A)$ e $B(m_B, \alpha_B)$, as seguintes operações podem ser efetuadas:

- adição:

$$C(m_C, \alpha_C) = A \oplus B \quad (2.2)$$

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

- subtração:

$$D(m_D, \alpha_D) = A \ominus B \quad (2.3)$$

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

Para a multiplicação foi necessário elaborar duas maneiras de cálculo (dois operadores para a multiplicação) em virtude das expressões presentes na solução do fluxo de carga possuírem diferentes quantidades de multiplicações e quando se trabalha com conjuntos nebulosos este fato pode levar a uma propagação indesejada do parâmetro α .

Os dois tipos de operadores, que a partir de agora serão referenciados por função faixa larga e função faixa estreita, diferem apenas em parte dos cálculos necessários para se efetuar a multiplicação, como visto na sequência.

- multiplicação:

- a) função faixa larga

$$E(m_E, \alpha_E) = A \otimes B \quad (2.4)$$

$$m_E = m_A \cdot m_B \quad \alpha_E = \alpha calc(3)$$

onde $\alpha calc(3)$ é o terceiro elemento do vetor:

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

ord - função de ordenação (coloca os elementos do vetor em ordem crescente)

- b) função faixa estreita

$$E(m_E, \alpha_E) = A \underline{\otimes} B \quad (2.5)$$

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

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

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

Foi necessária a definição destes dois tipos de funções para efetuar a multiplicação pois a partir dos testes iniciais com os fluxos, onde se utilizava somente a função de faixa larga nos cálculos, notou-se que o parâmetro α tinha diferentes comportamentos com relação aos fluxos e perdas nos ramos e as potências geradas nas barras. A partir destes testes notou-se que este fato era devido às expressões para o cálculo destas variáveis possuírem diferentes quantidades de multiplicações.

Observando os cálculos passo a passo, pode-se notar que caso fosse restringido o valor de α durante o cálculo das multiplicações, este problema seria resolvido. Foi então que se

resolveu tomar o segundo elemento do vetor α_{calc} ao invés do terceiro e criar a função de faixa estreita buscando os operadores que melhor se adaptam aos cálculos que estão sendo executados, já que a matemática nebulosa permite isto.

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).

Com estas operações é possível elaborar os modelos dos fluxos de carga nebulosos efetuando os cálculos a partir de equações baseadas nas equações do fluxo de carga determinístico.

2.1.2 Conjunto nebuloso

É através do conceito de conjunto nebuloso que se procura estudar, tratar, a informação imprecisa e vaga. Enquanto os conjuntos da teoria clássica (conjuntos *crisp*) são definidos por funções características, os conjuntos nebulosos são definidos por funções de pertinência que exprimem o quão pertinente um elemento é de uma dada classe.

Considere o conjunto A de um universo X . Um conjunto nebuloso é caracterizado pelo par $(x, \mu_A(x))$, onde x é a variável em estudo e $\mu_A(x)$ é o grau de pertinência de $x(x \in X)$ com relação a A .

Se X representado por $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ então, para o caso discreto, o conjunto A pode ser expresso na forma:

$$A = \{\mu_A(x_1)/x_1; \mu_A(x_2)/x_2; \mu_A(x_3)/x_3; \dots; \mu_A(x_n)/x_n\} \quad (2.6)$$

$$A = \sum_{i=1}^n \mu_A(x_i)/x_i \quad (2.7)$$

E para o caso contínuo:

$$A = \int_X \mu_A(x_i)/x_i \quad (2.8)$$

Apenas para exemplificar, considere a representação de um conjunto de números naturais pequenos: $A = 1/1; 1/2; 1/3; 0,8/4; 0,5/5; 0,4/6; 0,2/7; 0/8; 0/9$.

O primeiro número representa o quão pertinente o elemento em questão, segundo número, é da classe dos números naturais pequenos.

2.1.3 Cortes de nível (α -cuts)

Esta ferramenta, [Kenarangui e Seifi, 1994] e [Sandri, 1997], foi elaborada para permitir uma maneira de se efetuar cálculos com funções de pertinência, aqui correspondente à trapezoidal. A partir do conjunto nebuloso são gerados conjuntos *crisp* para que se possa efetuar os cálculos com estes conjuntos utilizando, por exemplo, a aritmética intervalar.

Um corte de nível de um conjunto nebuloso A (figura 2.4) gera um subconjunto A^α que contém os elementos de A que apresentam valores para a função de pertinência maiores do que α , ou seja:

$$A^\alpha = \{x \in X | \mu_A(x) > \alpha\}$$

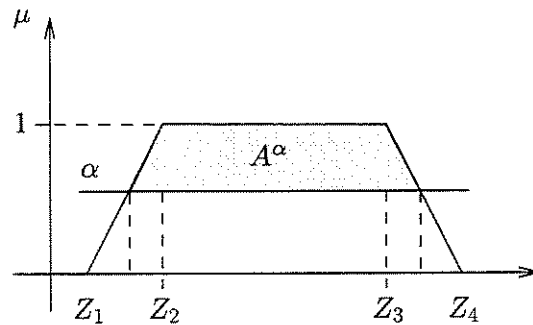


Figura 2.4: Representação de um corte de nível

Na figura, o corte de nível indicado resulta no seguinte intervalo: $[\alpha_1; \alpha_2]$.

No artigo [Miranda et al., 1994] os autores utilizam esta técnica para efetuar os cálculos com aritmética intervalar e para isto efetuam dois cortes de nível na função trapezoidal, um para $\alpha = 0$ e outro para $\alpha = 1$, gerando assim dois intervalos como mostrado a seguir:

$$\begin{array}{ll} \alpha = 0 & [Z_1; Z_4] \\ \alpha = 1 & [Z_2; Z_3] \end{array}$$

No método aqui proposto, não é necessária a utilização desta técnica, pois a função sinusoidal possui seus operadores para que os cálculos sejam efetuados diretamente. Devido a este fato reduz-se o esforço computacional.

2.2 Teoria de possibilidades

A Teoria de Possibilidades [Zadeh, 1978] trouxe uma grande flexibilidade no momento de codificar a informação incerta da variável de interesse.

Através da Teoria de Possibilidades, a informação fornecida por uma fonte de conhecimento sobre o quão pertinente um elemento x é de um universo X é convertida para a forma de uma distribuição de possibilidades.

A distribuição de possibilidades será igual à função de pertinência para uma mesma variável. Toda a fundamentação teórica para esta afirmação pode ser encontrada em [Zadeh, 1978]. Assim cada variável pode ter a sua distribuição de possibilidades.

Então para uma distribuição de possibilidades, representada por Π_A , tem-se:

$$\Pi_A = \pi_A$$

onde a função π_A que determina a distribuição de possibilidades, é definida como sendo igual à função de pertinência da mesma variável: $\pi_A = \mu_A(x)$.

Por exemplo, cada injeção líquida de potência ativa terá a sua própria distribuição de possibilidades e não ficará atrelada a uma distribuição geral feita para a potência ativa nas barras.

Isto permite uma maior versatilidade e expressividade para a variável em questão, no momento de ser trabalhada e analisada.

2.3 Aritmética intervalar

Faz-se agora uma sucinta apresentação desta aritmética devido ao fato de ser utilizada no artigo [Miranda et al., 1994] onde os autores recorrem a esta para efetuar os cálculos necessários e obter um resultado nebuloso para o fluxo de carga. Uma explicação mais detalhada pode ser encontrada em [Miranda, 1997](*murad@zipmail.com.br*).

2.3.1 Operações com intervalos

As operações com intervalos não podem ser efetuadas como as que são executadas com números reais, pois existem situações onde utilizando-se os operadores (soma, adição, subtração e divisão definidas para números reais) os resultados obtidos não serão coerentes. Certas propriedades válidas para operações com números reais não são válidas para números nebulosos e outras são.

Sejam X e Y dois intervalos quaisquer:

$$\begin{aligned} X &= [x_1, x_2] \\ Y &= [y_1, y_2] \end{aligned} \tag{2.9}$$

onde $x_1, x_2, y_1, y_2 \in \mathbb{R}$

Podem ser realizadas as seguintes operações:

- Adição $\rightarrow X + Y$

$$[x_1, x_2] + [y_1, y_2] = [x_1 + y_1, x_2 + y_2] \tag{2.10}$$

- Simetria $\rightarrow -X$

$$[x_1, x_2] = [-x_2, -x_1] \tag{2.11}$$

- Subtração $\rightarrow X - Y = X + (-Y)$

$$[x_1, x_2] - [y_1, y_2] = [x_1 - y_2, x_2 - y_1] \tag{2.12}$$

- Produto por constante $\rightarrow c \cdot X$

$$c \cdot [x_1, x_2] = [\min(c \cdot x_1), \max(c \cdot x_2)] \tag{2.13}$$

- Produto $\rightarrow X \cdot Y$

$$[x_1, x_2] \cdot [y_1, y_2] = [\min(x_1 \cdot y_1, x_1 \cdot y_2, x_2 \cdot y_1, x_2 \cdot y_2), \max(x_1 \cdot y_1, x_1 \cdot y_2, x_2 \cdot y_1, x_2 \cdot y_2)] \tag{2.14}$$

- Inverso $\rightarrow X^{-1}$

$$[x_1, x_2]^{-1} = [\min(x_1^{-1}, x_2^{-1}), \max(x_1^{-1}, x_2^{-1})] \tag{2.15}$$

- Divisão $\rightarrow X/Y = X \cdot (1/Y)$

$$\frac{[x_1, x_2]}{[y_1, y_2]} = [\min(\frac{x_1}{y_1}, \frac{x_1}{y_2}, \frac{x_2}{y_1}, \frac{x_2}{y_2}), \max(\frac{x_1}{y_1}, \frac{x_1}{y_2}, \frac{x_2}{y_1}, \frac{x_2}{y_2})] \tag{2.16}$$

Como já afirmado, as regras válidas para números reais nem sempre são válidas para os intervalos. Como exemplo pode-se citar:

$$X + X - X \neq X \quad (2.17)$$

Para $X = [3, 8]$ tem-se:

$$\begin{aligned} X + X &= [(3 + 3), (8 + 8)] = [6, 16] \\ X + X + (-X) &= [6, 16] + [-8, -3] = [-2, 13] \\ X + X + (-X) &= [-2, 13] \neq X \end{aligned}$$

Isto também acontece para $X \cdot X / X \neq X$ e portanto deve-se tomar cuidado com os cálculos a serem executados com intervalos e deve-se ter semelhante cuidado ao resolver equações com estes. Entretanto, algumas das regras são válidas como a comutativa e a associativa para a multiplicação e para a adição.

Nos algoritmos propostos em [Miranda et al., 1994], as multiplicações encontradas são entre matrizes com números constantes e intervalos. Visando um melhor entendimento dos cálculos a serem executados nas simulações, apresenta-se a seguir um exemplo deste tipo de multiplicação.

- Multiplicação entre matriz e vetor de intervalos

Os intervalos utilizados nestes cálculos são formados por desvios e para evitar dúvidas entre estes termos durante as explicações para os fluxos de carga propostos em [Miranda et al., 1994], é apresentado também como são obtidos os desvios e a partir destes os intervalos.

Para exemplificar o cálculo dos desvios, toma-se como exemplo a distribuição de possibilidades trapezoidal para a potência ativa líquida injetada em uma barra (figura 2.5). Os desvios são calculados a partir desta distribuição de possibilidades, através das diferenças entre o valor médio da distribuição de possibilidades (Z_m) e os pontos que definem este trapézio (Z_1, Z_2, Z_3 e Z_4), seguindo as equações (2.18).

$$\begin{aligned} \Delta Z_1 &= Z_1 - Z_m = 0,30 - 0,70 = -0,40 \\ \Delta Z_2 &= Z_2 - Z_m = 0,50 - 0,70 = -0,20 \\ \Delta Z_3 &= Z_3 - Z_m = 0,90 - 0,70 = 0,20 \\ \Delta Z_4 &= Z_4 - Z_m = 1,10 - 0,70 = 0,40 \end{aligned} \quad (2.18)$$

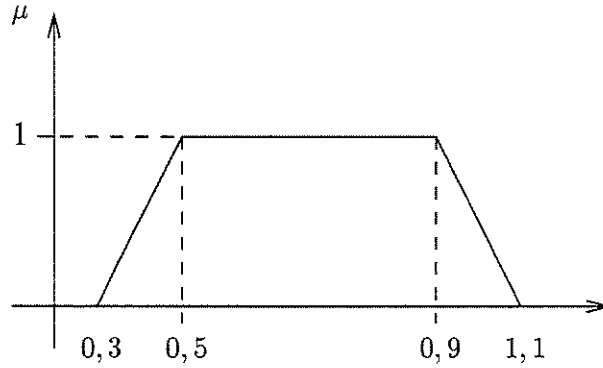


Figura 2.5: Potência ativa (p.u.) na forma trapezoidal

Com estes desvios forma-se uma distribuição de possibilidades (figura 2.6). A partir desta distribuição são formados os intervalos utilizados nos cálculos, através da técnica de cortes de nível.

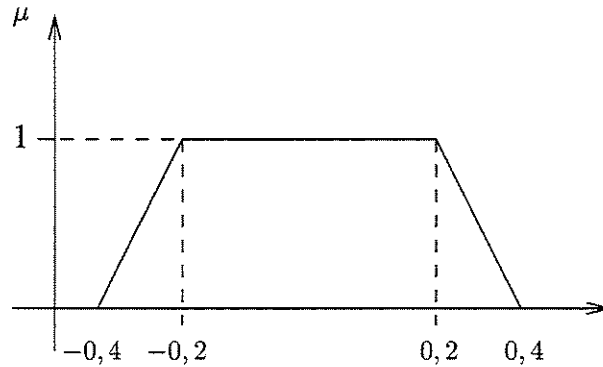


Figura 2.6: Distribuição de possibilidades para os desvios (p.u.)

Efetuando dois cortes de nível nas distribuições de possibilidades para os desvios, $\alpha = 0$ e $\alpha = 1$, obtém-se dois intervalos ($I_{\alpha(0/1)}^X$) para se efetuar os cálculos:

- para $\alpha = 0$

$$I_{\alpha(0)}^P = [\Delta Z_1; \Delta Z_4] = [-0,4; 0,4] \quad (2.19)$$

- para $\alpha = 1$

$$I_{\alpha(1)}^P = [\Delta Z_2; \Delta Z_3] = [-0,2; 0,2] \quad (2.20)$$

sendo $I_{\alpha(0/1)}^X$ o intervalo para a variável X (no caso, potência ativa (P)) considerando-se os cortes de nível 0 e 1.

Este procedimento é executado para todas as distribuições de possibilidades que vão ser incluídas nos cálculos, obtendo-se então um vetor com estes intervalos a ser multiplicado por uma matriz cujo resultado é um vetor de intervalos que são convertidos em desvios.

Como exemplo, toma-se uma matriz X e um vetor Y para ilustrar esta multiplicação:

$$X = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ \frac{2}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix}$$

$$Y = \begin{bmatrix} (-1; 1) \\ (-1; 1) \end{bmatrix}$$

Efetuada a multiplicação, obtém-se:

$$[I_{\alpha(0)}^Y] = \begin{bmatrix} (-\frac{2}{3}; \frac{2}{3}) \\ (-\frac{2}{3}; \frac{2}{3}) \\ (-\frac{2}{3}; \frac{2}{3}) \end{bmatrix}$$

sendo $I_{\alpha(0)}^Y$ o vetor de intervalos para a variável Y, cujos valores numéricos correspondem a desvios.

Por exemplo, se X for a matriz B' do fluxo de carga linearizado e Y o vetor dos intervalos, formado pelos desvios das potências ativas, o vetor resultante corresponde aos intervalos dos desvios para os ângulos nas barras.

Estes intervalos resultantes são utilizados para se fazer um caminho oposto ao feito anteriormente, onde a partir das distribuições de possibilidades das variáveis obteve-se os desvios. Agora, a partir dos desvios (que formam os intervalos calculados) pode-se obter as distribuições de possibilidades para as variáveis resultantes da multiplicação, bastando conhecer os respectivos valores médios.

2.4 Cosseno e seno nebuloso

Foi necessária a definição de um cosseno e de um seno nebuloso, pois ao efetuar, por exemplo, os cálculos dos fluxos de potência nos ramos, os valores calculados ficavam a desejar, caso fosse utilizada a metodologia convencional, utilizada por todas as calculadoras.

Uma primeira alternativa consistiu em expandir as operações em série de Taylor, equação (2.21), e utilizando as operações matemáticas já descritas, efetuar os cálculos para o seno e o cosseno.

$$\cos(\theta_m, \alpha_\theta) = 1 - \frac{\cos(\theta_m, \alpha_\theta)^2}{2!} + \frac{\cos(\theta_m, \alpha_\theta)^4}{4!} - \frac{\cos(\theta_m, \alpha_\theta)^6}{6!} + \frac{\cos(\theta_m, \alpha_\theta)^8}{8!} - \dots \quad (2.21)$$

No entanto, isto não forneceu bons resultados devido às diversas multiplicações, como nos termos elevados a décima potência. Os desvios assumiam valores absurdos devido à propagação dos erros que ocorrem por causa das multiplicações [Pedrycz e Gomide, 1998].

A solução encontrada, foi calcular os valores de $\sin(\theta_m, \alpha_\theta)$ e $\cos(\theta_m, \alpha_\theta)$ de uma forma aproximada. Para isto, calcula-se o cosseno ou o seno para o valor mínimo do ângulo ($\sin(\theta_m - \alpha_\theta)$) e para o valor máximo ($\sin(\theta_m + \alpha_\theta)$), faz-se uma média dos desvios destes valores com relação ao valor médio calculado ($\cos(\theta_m)$ ou $\sin(\theta_m)$), tomando este valor como o valor de α para a operação em questão, como visto na sequência.

$$\begin{aligned} \theta_{max} &= \theta_m + \alpha_\theta \\ \theta_{min} &= \theta_m - \alpha_\theta \end{aligned} \quad (2.22)$$

$$\cos(\theta_m, \alpha_\theta) = (m_{result}, \alpha_{result}) \quad (2.23)$$

onde

$$\begin{aligned} m_{result} &= \cos(\theta_m) \\ \alpha_{result} &= [(|\cos(\theta_{max})| - |\cos(\theta_m)|) + (|\cos(\theta_m)| - |\cos(\theta_{min})|)]/2 \end{aligned} \quad (2.24)$$

Para o seno adota-se o mesmo procedimento. Lembrando mais uma vez, este é um cálculo aproximado de um cosseno ou seno nebuloso.

Este capítulo poderia se estender muito mais, mas o objetivo principal é apenas mostrar os recursos mais empregados durante o desenvolvimento da tese. A bibliografia [Pedrycz e Gomide, 1998] e [Sandri, 1997] contempla outras definições caso seja necessário um maior aprofundamento.

Capítulo 3

Fluxo de Carga Newton *Fuzzy*

O Fluxo de Carga Newton (FCN) é um método que proporciona o cálculo das variáveis de estado (magnitude e ângulo das tensões nas barras). A partir destes valores pode-se obter os valores das potências ativa e reativa nas barras e dos fluxos e perdas de potência nos ramos.

A seguir apresenta-se uma síntese da metodologia para o cálculo do FCN convencional, já que o mesmo pode ser encontrado com detalhes em [Monticelli, 1983]. Não é apresentada a modelagem das partes do sistema, já que estes tópicos também são facilmente encontrados na literatura.

3.1 FCN - Fluxo de Carga Newton Convencional

O FCN consiste em resolver um sistema de equações através do método iterativo de Newton. Através da determinação de um vetor de correção $\Delta \underline{x}$ procura-se resolver o sistema de equações $\underline{g}(\underline{x}^v) = \underline{0}$, sendo que a cada iteração deve-se resolver a equação (3.1).

$$\underline{g}(\underline{x}^v) = -\underline{J}(\underline{x}^v) \cdot \Delta \underline{x}^v \quad (3.1)$$

Relacionando as variáveis do FCN com as da expressão (3.1), tem-se:

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

$$\underline{g}(\underline{x}^v) = \begin{bmatrix} \Delta \underline{P}^v \\ \Delta \underline{Q}^v \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

sendo

$$\begin{aligned}\Delta \underline{P} &= \underline{P}^{esp} - \underline{P}(\underline{V}, \underline{\theta}) \\ \Delta \underline{Q} &= \underline{Q}^{esp} - \underline{Q}(\underline{V}, \underline{\theta})\end{aligned}\tag{3.3}$$

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

$$\Delta \underline{x}^v = \begin{bmatrix} \Delta \underline{\theta}^v \\ \Delta \underline{V}^v \end{bmatrix}\tag{3.4}$$

- $\mathbf{J}(\underline{x}^v)$, matriz formada pelas derivadas parciais de (3.3) com relação a $\underline{V}$ e $\underline{\theta}$:

$$\mathbf{J}(\underline{x}^v) = \begin{bmatrix} \frac{\delta \Delta \underline{P}^v}{\delta \underline{\theta}^v} & \frac{\delta \Delta \underline{P}^v}{\delta \underline{V}^v} \\ \frac{\delta \Delta \underline{Q}^v}{\delta \underline{\theta}^v} & \frac{\delta \Delta \underline{Q}^v}{\delta \underline{V}^v} \end{bmatrix}\tag{3.5}$$

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

Esta matriz, denominada matriz Jacobiana, pode ser simplificada, lembrando que nas equações (3.3) 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:

$$\mathbf{J}(\underline{x}^v) = - \begin{bmatrix} \frac{\delta \underline{P}^v}{\delta \underline{\theta}^v} & \frac{\delta \underline{P}^v}{\delta \underline{V}^v} \\ \frac{\delta \underline{Q}^v}{\delta \underline{\theta}^v} & \frac{\delta \underline{Q}^v}{\delta \underline{V}^v} \end{bmatrix}\tag{3.6}$$

subdividida em quatro submatrizes:

$$\mathbf{J}(\underline{x}^v) = - \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix}^v\tag{3.7}$$

onde

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

sendo V_k e V_m as magnitudes das tensões nodais; Ω_k o conjunto das barras vizinhas à barra k ; P_k e Q_k as potências ativa e reativa calculadas através de (3.8); G_{km} e B_{km} as partes real e imaginária do elemento km da matriz admitância; θ_{km} a abertura angular entre as barras k e m .

$$\begin{aligned}
P_k &= V_k \cdot \sum_{m \in K} V_m \cdot (G_{km} \cdot \text{cos}(\theta_{km}) + B_{km} \cdot \text{sen}(\theta_{km})) \\
Q_k &= V_k \cdot \sum_{m \in K} V_m \cdot (G_{km} \cdot \text{sen}(\theta_{km}) - B_{km} \cdot \text{cos}(\theta_{km}))
\end{aligned} \tag{3.8}$$

Assim tem-se a formulação matricial para o FCN:

$$\begin{bmatrix} \Delta \underline{P}^v \\ \Delta \underline{Q}^v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix}^v \cdot \begin{bmatrix} \Delta \underline{\theta}^v \\ \Delta \underline{V}^v \end{bmatrix} \tag{3.9}$$

Pela resolução do sistema anterior, obtém-se os desvios para os ângulos e para as magnitudes das tensões e, conseqüentemente, o novo estado do sistema. Assim, pode-se calcular os novos valores de potência para recalcular (3.3) 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 $V\theta$, não fornecidos $\rightarrow$ formar os vetores $\underline{V}^0$ e $\underline{\theta}^0$
- ii. calcular $P_k(V^v, \theta^v)$ para as barras PQ e PV; $Q_k(V^v, \theta^v)$ para as barras PQ e os desvios de potência ΔP_k^v e ΔQ_k^v
- iii. testar a convergência: se $\max\{|\Delta P_k^v| \}_{k=PQ, PV} \leq \epsilon_P$ e $\max\{|\Delta Q_k^v| \}_{k=PQ} \leq \epsilon_Q$ o processo convergiu $\rightarrow$ ir para vii
se não, prosseguir:
- iv. calcular a matriz Jacobiana para os valores (V^v, θ^v)
- v. determinar a solução (V^{v+1}, θ^{v+1}) :

$$\begin{aligned}\underline{\theta}^{v+1} &= \underline{\theta}^v + \Delta \underline{\theta}^{v+1} \\ \underline{V}^{v+1} &= \underline{V}^v + \Delta \underline{V}^{v+1}\end{aligned}\tag{3.10}$$

- vi. voltar ao passo (ii)
- vii. calcular P_k para a barra de referência e Q_k para as barras de referência e PV, através das expressões (3.8).

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, equações (3.8) 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 nos ramos do sistema, equações (3.11), e das perdas na transmissão (3.12).

$$\begin{aligned}
P_{km} &= V_k^2 \cdot g_{km} - tap_{km} \cdot V_k \cdot V_m \cdot (g_{km} \cdot \cos(\theta_{km}) + b_{km} \cdot \sin(\theta_{km})) \\
P_{mk} &= V_m^2 \cdot g_{km} \cdot tap_{km}^2 - V_k \cdot V_m \cdot tap_{km} \cdot (g_{km} \cdot \cos(\theta_{km}) - b_{km} \cdot \sin(\theta_{km})) \\
Q_{km} &= -V_k^2 \cdot (b_{km} + b_{km}^{sh}) - tap_{km} \cdot V_k \cdot V_m \cdot (g_{km} \cdot \sin(\theta_{km}) - b_{km} \cdot \cos(\theta_{km})) \\
Q_{mk} &= -V_m^2 \cdot (b_{km} + b_{km}^{sh}) \cdot tap_{km}^2 + tap_{km} \cdot V_k \cdot V_m \cdot (g_{km} \cdot \sin(\theta_{km}) + b_{km} \cdot \cos(\theta_{km}))
\end{aligned} \tag{3.11}$$

$$P_{km}^{Perdas} = g_{km} \cdot V_k^2 + g_{km} \cdot V_m^2 \cdot tap_{km}^2 - 2 \cdot tap_{km}^2 \cdot V_k \cdot V_m \cdot g_{km} \cdot \cos(\theta_{km}) \tag{3.12}$$

3.2 FCNT - Fluxo de Carga Newton *Fuzzy* Trapezoidal

No método proposto em [Miranda et al., 1994] os autores procuram refletir as imprecisões das potências nas barras, para os ângulos, magnitudes das tensões, fluxos e perdas de potência nos ramos. No FCNT os autores utilizam a função trapezoidal para representar os números nebulosos.

Para obter as distribuições de possibilidades resultantes das grandezas do sistema, simula-se um FCN com os valores médios das distribuições de possibilidades das potências e a partir dos resultados determinísticos V_m , θ_m , P_{ik}^m , Q_{ik}^m , P_g^m , Q_g^m e P_{perdas}^m e do cálculo dos intervalos formados pelos desvios destas mesmas variáveis, formam-se as distribuições de possibilidades para estas pela superposição dos valores médios com os dos respectivos desvios nebulosos.

A determinação destes desvios deve seguir a sequência de cálculos descrita a seguir.

O primeiro passo é a determinação dos desvios referentes às potências ativa e reativa com relação aos seus respectivos valores médios (pontos médios das distribuições do banco de dados):

$$\Delta Z_{kn} = Z_{kn} - Z_k^m \tag{3.13}$$

onde

$k = 1, 2, \dots, nb$ (número de barras);

$n = 1, 2, 3, 4$;

Z_{kn} - ponto n da distribuição trapezoidal para a potência ativa ou reativa na barra k ;

Z_k^m - ponto médio da distribuição trapezoidal para a potência ativa ou reativa na barra k ;

ΔZ_{kn} - desvio do ponto n, referente à potência ativa ou reativa na barra k.

Com os desvios para as potências ativa e reativa calculados, é possível formar os intervalos ($I_{\alpha(0/1)}^Z$) que são utilizados nos cálculos dos desvios dos ângulos nas barras e das magnitudes das tensões. Lembrando que a variável Z está representando um vetor que possui dados das potências ativa e reativa, respectivamente nesta seqüência, assim como X representa os dados para os ângulos e as magnitudes das tensões.

A partir da matriz Jacobiana (J) construída na última iteração do FCN e dos intervalos formados com os desvios das potências ativa e reativa, pode-se obter os intervalos formados pelos desvios para os ângulos nas barras e as magnitudes das tensões, de acordo com (3.14), e então obter as distribuições de possibilidades destas variáveis com a expressão (3.15).

$$[I_{\alpha(0/1)}^X] = [J]^{-1} \cdot [I_{\alpha(0/1)}^Z] \quad (3.14)$$

$$X_{kn} = X_k^m + \Delta X_{kn} \quad (3.15)$$

onde

X_{kn} - ponto n da distribuição de possibilidades para o ângulo ou para a magnitude da tensão na barra k;

X_k^m - ponto médio para a distribuição de possibilidades para o ângulo ou para a magnitude da tensão na barra k, calculado com o FCN;

ΔX_{kn} - desvios do ponto n obtidos a partir dos intervalos calculados anteriormente para a barra k.

Finalizados estes cálculos, as distribuições de possibilidades para os desvios das magnitudes das tensões e dos ângulos nas barras, são referenciadas respectivamente por: $\Delta \tilde{V}$ e $\Delta \tilde{\theta}$.

Obtidas as distribuições de possibilidades dos ângulos e das magnitudes das tensões, obtém-se as distribuições para os fluxos de potência nos ramos, o que não é uma tarefa tão fácil quanto a anterior. Para os fluxos de potência deve-se efetuar linearizações das funções utilizadas neste cálculo (equações (3.16)), de acordo com as expansões em série de Taylor em torno dos valores médios associados.

$$\begin{aligned} P_{ik} &= f_1(V_i, V_k, \theta_i, \theta_k) \\ Q_{ik} &= f_2(V_i, V_k, \theta_i, \theta_k) \end{aligned} \quad (3.16)$$

Como exemplo tem-se a linearização para o fluxo de potência ativa:

$$\begin{aligned}
f_1(V_i, V_k, \theta_i, \theta_k) &= -V_i^2 \cdot G_{ik} + V_i \cdot V_k \cdot (G_{ik} \cdot \cos(\theta_{ik}) + B_{ik} \cdot \text{sen}(\theta_{ik})) \\
\frac{\delta f_1}{\delta V_i} &= -2 \cdot V_i \cdot G_{ik} + V_k \cdot (G_{ik} \cdot \cos(\theta_{ik}) + B_{ik} \cdot \text{sen}(\theta_{ik})) \\
\frac{\delta f_1}{\delta V_k} &= V_i \cdot (G_{ik} \cdot \cos(\theta_{ik}) + B_{ik} \cdot \text{sen}(\theta_{ik})) \\
\frac{\delta f_1}{\delta \theta_i} &= V_i \cdot V_k \cdot (-G_{ik} \cdot \text{sen}(\theta_{ik}) + B_{ik} \cdot \cos(\theta_{ik})) \\
\frac{\delta f_1}{\delta \theta_k} &= V_i \cdot V_k \cdot (G_{ik} \cdot \text{sen}(\theta_{ik}) - B_{ik} \cdot \cos(\theta_{ik}))
\end{aligned} \tag{3.17}$$

Pode-se efetuar uma aproximação, utilizando os primeiros termos da série de Taylor. Assim, os desvios ΔP_{ik} são expressos por:

$$\Delta P_{ik} = \frac{\delta f_1}{\delta V_i (V_i=V_{di})} \cdot \Delta V_i + \frac{\delta f_1}{\delta V_k (V_k=V_{dk})} \cdot \Delta V_k + \frac{\delta f_1}{\delta \theta_i (\theta_i=\theta_{di})} \cdot \Delta \theta_i + \frac{\delta f_1}{\delta \theta_k (\theta_k=\theta_{dk})} \cdot \Delta \theta_k \tag{3.18}$$

Na expressão anterior, se no momento de efetuar os cálculos forem consideradas as distribuições de possibilidades $\Delta \tilde{V}_i$, $\Delta \tilde{V}_k$, $\Delta \tilde{\theta}_i$ e $\Delta \tilde{\theta}_k$, já calculadas, ao invés de valores constantes (ΔP_{ik}), os resultados obtidos são as distribuições de possibilidades para os desvios dos fluxos de potência ativa nos ramos ($\Delta \tilde{P}_{ik}$).

$$\Delta \tilde{P}_{ik} = \frac{\delta f_1}{\delta V_i (V_i=V_{di})} \cdot \Delta \tilde{V}_i + \frac{\delta f_1}{\delta V_k (V_k=V_{dk})} \cdot \Delta \tilde{V}_k + \frac{\delta f_1}{\delta \theta_i (\theta_i=\theta_{di})} \cdot \Delta \tilde{\theta}_i + \frac{\delta f_1}{\delta \theta_k (\theta_k=\theta_{dk})} \cdot \Delta \tilde{\theta}_k \tag{3.19}$$

Utilizando estas distribuições de possibilidades dos desvios, é possível obter as distribuições de possibilidades finais dos fluxos de potência ativa através da expressão (3.20).

$$\tilde{P}_{ik} = P_{ik}^m + \Delta \tilde{P}_{ik} \tag{3.20}$$

onde

$\tilde{P}_{ik}$ - distribuição de possibilidades para o fluxo de potência ativo no ramo ik ;

P_{mik} - ponto médio para o fluxo de potência ativo no ramo ik , calculado com o FCN;

$\Delta \tilde{P}_{ik}$ - distribuições de possibilidades para os desvios do fluxo de potência ativo no ramo ik , calculado através de (3.19).

Fazendo a mesma analogia, mas com a função f_2 , obtém-se as distribuições para os fluxos de potência reativa.

Utilizando da mesma técnica, pode-se linearizar as expressões das potência ativa gerada na barra de referência e da potências reativas geradas nas barras de referência e barras PVs, equações (3.21).

$$\begin{aligned} P_k &= f_3(V_i, \dots, V_n, \theta_i, \dots, \theta_n) \\ Q_k &= f_4(V_i, \dots, V_n, \theta_i, \dots, \theta_n) \end{aligned} \quad (3.21)$$

Utilizando somente os primeiros termos da linearização em série de Taylor, equação (3.22) e novamente, utilizando as distribuições de possibilidades dos desvios para as magnitudes e os ângulos das tensões nas barras, obtém-se as distribuições de possibilidades para os desvios da potência ativa gerada na barra de referência.

$$\begin{aligned} \Delta P_k = \frac{\delta f_3}{\delta V_i (V_i=V_{di})} \cdot \Delta V_i + \dots + \frac{\delta f_3}{\delta V_n (V_n=V_{dn})} \cdot \Delta V_n + \frac{\delta f_3}{\delta \theta_i (\theta_i=\theta_{di})} \cdot \Delta \theta_i + \dots \\ \dots + \frac{\delta f_3}{\delta \theta_n (\theta_n=\theta_{dn})} \cdot \Delta \theta_n \end{aligned} \quad (3.22)$$

O mesmo é feito para a potência reativa.

Depois de efetuados os cálculos para se obter as distribuições de possibilidades dos desvios para as potências, utilizam-se as expressões (3.23) para efetuar os cálculos das distribuições de possibilidades finais para a potência ativa gerada na barra de referência e para as potências reativas geradas nas barras de referência e PVs.

$$\begin{aligned} \tilde{P}_g &= P_g^m + \Delta \tilde{P}_g \\ \tilde{Q}_g &= Q_g^m + \Delta \tilde{Q}_g \end{aligned} \quad (3.23)$$

Para as perdas nos ramos, a técnica utilizada até agora, ou seja de linearizar as expressões utilizadas nos cálculos das variáveis, não é satisfatória, principalmente para os ramos onde se tem um pequeno fluxo ou que possam ter reversão do mesmo. Para estes casos os autores determinaram uma nova matriz (S) para o cálculo das perdas:

$$[S] = [D] \cdot [J]^{-1} \quad (3.24)$$

Os elementos da matriz D são as derivadas parciais das perdas ativas ou reativas, com relação a $\underline{V}$ e $\underline{\theta}$, nas barras das extremidades do ramo em questão. É possível, então, obter as distribuições das perdas de acordo com (3.25).

$$\tilde{P}_{perdasik} = P_{perdasik}^m + \sum_{j=1}^{nr} S_j \cdot \Delta \tilde{Z}_j \quad (3.25)$$

sendo j um ramo ik do sistema e nr o número de ramos do sistema.

Onde os desvios $\Delta\tilde{Z}_j$ devem ser escolhidos de acordo com o sinal dos coeficientes de sensibilidade:

- para o valor máximo, deve-se tomar o maior valor possível para $\Delta\tilde{Z}_j$ se $S_j > 0$, enquanto deve-se utilizar o menor valor possível de $\Delta\tilde{Z}_j$ se $S_j < 0$
- para o valor mínimo, deve-se tomar o maior valor possível para $\Delta\tilde{Z}_j$ se $S_j < 0$, enquanto deve-se utilizar o menor valor possível de $\Delta\tilde{Z}_j$ se $S_j > 0$

Dessa forma obtém-se os resultados na forma nebulosa, como desejado.

3.3 FCNS - Fluxo de Carga Newton *Fuzzy* Sinusoidal

Desenvolveu-se o FCNS visando obter uma distribuição de possibilidades para os resultados e utilizar os operadores nebulosos da função sinusoidal para o maior número de cálculos efetuados. E também simplificar os cálculos na forma nebulosa.

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 nebuloso para determinístico e ao final vice-versa.

Para isto desenvolveu-se o FCNS de acordo com o modelo convencional, utilizando a mesma metodologia do FCN mas realizando os cálculos (somas, multiplicações e subtrações) na forma nebulosa. Os cálculos foram executados como descrito no item 2.1.2.2.

No entanto, esta técnica não proporcionou bons resultados, pois os desvios obtidos eram absurdos, devido ao já citado fenômeno da propagação dos desvios, causado pela grande quantidade de multiplicações presentes durante o processo de convergência. Com isto teve-se que procurar uma nova maneira de executar os cálculos.

Foi necessário recorrer ao mesmo artifício utilizado em [Miranda et al., 1994], em que se calcula um FCN 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 FCNS tem que ser simulada utilizando o FCN, sendo que este é simulado até o momento do cálculo das magnitudes das tensões e dos ângulos, não sendo necessário o cálculo dos fluxos nos ramos, perdas e potências.

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. As demais variáveis do fluxo de carga são calculadas diretamente na forma nebulosa.

É proposta também uma maneira discreta de efetuar os cálculos. A seguir são descritas estas formas para obter os resultados na forma nebulosa.

3.3.1 Metodologia utilizando os operadores nebulosos

O primeiro passo para obter as distribuições de possibilidades para os resultados é simular um FCN com os valores centrais das distribuições dos dados fornecidos para o sistema, ou seja, utilizam-se apenas os valores de m relativos aos dados (figura 3.1). A partir desta simulação, obtém-se os valores $\underline{V}_d$ e $\underline{\theta}_d$.

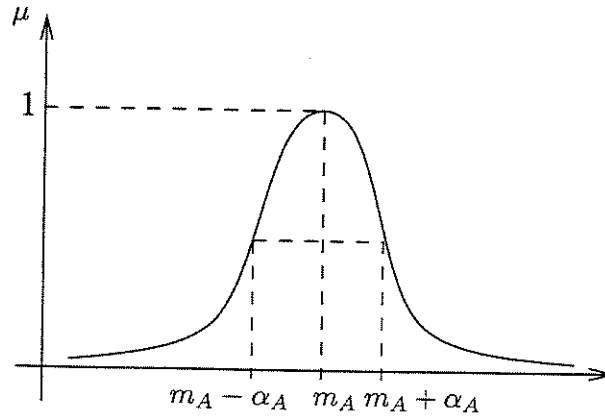


Figura 3.1: Função sinusoidal

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

Os desvios para $\underline{V}_d$ e $\underline{\theta}_d$ são obtidos multiplicando-se a matriz Jacobiana obtida na última iteração pelos valores dos desvios das injeções líquidas das potências de entrada (α_{Pliq} e α_{Qliq}).

Os desvios líquidos para as injeções de potência ativa e reativa são obtidos a partir dos desvios fornecidos para as potências ativa e reativa nas barras no banco de dados. Tomando como exemplo o formato PECO para banco de dados, onde tem-se colunas para as potências gerada e consumida, tanto ativa como reativa, pode-se calcular os desvios para as injeções líquidas de potência, tomando-se o menor desvio entre os desvios para as potências geradas e os desvios para as potências consumidas. Como exemplo, suponha que uma barra PV possui potência reativa gerada (e conseqüentemente α_{Qgerk}) e potência reativa consumida ($\alpha_{Qcargak}$), 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 (3.26).

$$\begin{aligned}\alpha_{Pliqk} &= \min(\alpha_{Pgerk}, \alpha_{Pcargak}) & \alpha_{Pliqk} &\neq 0 \\ \alpha_{Qliqk} &= \min(\alpha_{Qgerk}, \alpha_{Qcargak}) & \alpha_{Qliqk} &\neq 0\end{aligned}\quad (3.26)$$

onde

- α_{Pliqk} e α_{Qliqk} - são respectivamente os desvios líquidos das potências ativa e reativa na barra k
- α_{Pgerk} e α_{Qgerk} - são respectivamente os desvios das potências ativa e reativa geradas na barra k
- $\alpha_{Pcargak}$ e $\alpha_{Qcargak}$ - 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 no banco de dados é dado desvio nulo para as potências desta barra.

A multiplicação efetuada para a obtenção dos desvios, 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 FCN 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 $\underline{\alpha}_{Qliqcalc}$ (condição de *FLAT START*) 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 estas variáveis na forma nebulosa.

$$\underline{\alpha}_{(\theta,V)} = [J_{final}]^{-1} \cdot \underline{\alpha}_{liqPQ} \quad (3.27)$$

onde

$[J_{final}]$ - matriz construída na última iteração do fluxo de carga Newton

$\underline{\alpha}_{(\theta,V)}$ - vetor dos desvios dos ângulos e magnitudes das tensões das 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 PVs e 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 nos ramos utiliza-se a função de faixa estreita, para restringir o valor de α que tende a aumentar devido ao número de multiplicações presente nestas expressões. Com exceção dos ramos que são transformadores, onde se utiliza a função de faixa larga.

No restante dos cálculos (perdas na transmissão e potências geradas) também se utiliza a função de faixa larga.

O cálculo dos fluxos de potência nos ramos é executado utilizando-se as mesmas estruturas das expressões do FCN, onde se utiliza $\tilde{V}$ e $\tilde{\theta}$ na forma nebulosa. As operações são executadas com os operadores descritos no item 2.1.2.2, ou seja, utilizando os operadores nebulosos desenvolvidos para a função sinusoidal, como indicado nas equações (3.28).

$$\begin{aligned}
\tilde{P}_{km} &= \tilde{V}_k^2 \otimes g_{km} \ominus \tilde{V}_k \otimes tap_{km} \otimes \tilde{V}_m \otimes (g_{km} \otimes \cos(\tilde{\theta}_{km}) \oplus b_{km} \otimes \sin(\tilde{\theta}_{km})) \\
\tilde{P}_{mk} &= \tilde{V}_m^2 \otimes g_{km} \otimes tap_{km}^2 \ominus tap_{km} \otimes \tilde{V}_k \otimes \tilde{V}_m \otimes (g_{km} \otimes \cos(\tilde{\theta}_{km}) \ominus b_{km} \otimes \sin(\tilde{\theta}_{km})) \\
\tilde{Q}_{km} &= \tilde{V}_k^2 \otimes (b_{km} \oplus b_{km}^{sh}) \ominus tap_{km} \otimes \tilde{V}_k \otimes \tilde{V}_m \otimes (g_{km} \otimes \sin(\tilde{\theta}_{km}) \ominus b_{km} \otimes \cos(\tilde{\theta}_{km})) \\
\tilde{Q}_{mk} &= \tilde{V}_m^2 \otimes (b_{km} \oplus b_{km}^{sh}) \otimes tap_{km}^2 \ominus tap_{km} \otimes \tilde{V}_k \otimes \tilde{V}_m \otimes (g_{km} \otimes \sin(\tilde{\theta}_{km}) \oplus b_{km} \otimes \cos(\tilde{\theta}_{km}))
\end{aligned} \tag{3.28}$$

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;

$\ominus$ e $\oplus$ - subtração e soma nebulosas definidas em 2.1.2.2.

Para as perdas também executam-se os cálculos da mesma maneira, equação (3.29), com as operações na forma nebulosa.

$$\tilde{P}_{Perdaskm} = g_{km} \otimes \tilde{V}_k^2 + g_{km} \otimes \tilde{V}_m^2 \otimes tap_{km}^2 - 2 \otimes tap_{km}^2 \otimes \tilde{V}_k \otimes \tilde{V}_m \otimes g_{km} \otimes cosfuzzy(\theta_{km}) \tag{3.29}$$

Finalmente, nas expressões (3.30), têm-se as expressões na forma nebulosa para o cálculo

das potências reativas geradas nas barras de referência e PVs e da potência ativa gerada na barra de referência.

$$\begin{aligned}\tilde{P}_k &= \tilde{V}_k \otimes \sum_{m \in K} \tilde{V}_m \otimes (G_{km} \otimes \cos(\tilde{\theta}_{km}) \oplus B_{km} \otimes \sin(\tilde{\theta}_{km})) \\ \tilde{Q}_k &= \tilde{V}_k \otimes \sum_{m \in K} \tilde{V}_m \otimes (G_{km} \otimes \sin(\tilde{\theta}_{km}) \ominus B_{km} \otimes \cos(\tilde{\theta}_{km}))\end{aligned}\quad (3.30)$$

sendo

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

Foram detectados alguns problemas de sensibilidade na função de multiplicação, onde dependendo da variação dos valores de α das tensões e ângulos nas barras terminais, não obtém-se valores de desvios aceitáveis para os resultados. Por este motivo não se obteve resultados tão bons para os fluxos nos ramos com baixo carregamento quanto aos obtidos para os ramos com fluxos elevados. Comentários mais detalhados estão no Capítulo 6.

3.3.2 Metodologia discreta

Visando minimizar os erros para os ramos com baixos fluxos, foi desenvolvida uma maneira “discreta” de se calcular os fluxos nos 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 do fluxo de carga com o FCN 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 $\underline{\tilde{V}}$ e $\underline{\tilde{\theta}}$ 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. O problema maior foi criar a rotina que a partir de um indicador pudesse detectar se a magnitude da tensão e o ângulo aumentavam ou diminuíam com o aumento da potência.

A maneira adotada para obter este indicador foi a de tomar os valores máximos de potência nas barras e subtrair deste valor o valor final 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 (3.31).

$$\Delta Z = (Z_{gerespec} + \alpha_{Zgerespec}) - (Z_{cargaespec} + \alpha_{Zcargaespec}) - Z_{calcatual} \quad (3.31)$$

3 Fluxo de Carga Newton *Fuzzy*

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, equação (3.32).

$$\begin{bmatrix} \alpha_{\theta sinal} \\ \alpha_{v sinal} \end{bmatrix} = [J]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \underline{P} \\ \Delta \underline{Q} \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

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

$$\begin{aligned} V_{min} &= (V_{mk} - \alpha_{V_k}) \\ V_{max} &= (V_{mk} + \alpha_{V_k}) \end{aligned} \quad (3.33)$$

- caso contrário:

$$\begin{aligned} V_{min} &= (V_{mk} + \alpha_{V_k}) \\ V_{max} &= (V_{mk} - \alpha_{V_k}) \end{aligned} \quad (3.34)$$

E para o ângulo, se este for positivo

- e o indicador negativo:

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

- e o indicador positivo:

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

Se o ângulo for negativo:

- e o indicador negativo:

$$\begin{aligned} \theta_{min} &= (\theta_{mk} - \alpha_{\theta_k}) \\ \theta_{max} &= (\theta_{mk} + \alpha_{\theta_k}) \end{aligned} \quad (3.37)$$

- e o indicador positivo:

$$\begin{aligned} \theta_{min} &= (\theta_{mk} + \alpha_{\theta_k}) \\ \theta_{max} &= (\theta_{mk} - \alpha_{\theta_k}) \end{aligned} \quad (3.38)$$

Após determinados os valores máximos e mínimos para estas variáveis, resta somente calcular os valores também máximos e mínimos para as variáveis restantes do fluxo de carga.

Para efetuar estes cálculos são utilizadas as expressões do FCN diretamente, conforme (3.39), onde está sendo calculada a potência ativa gerada máxima nas barras de referência e PVs. O mesmo procedimento é repetido para os pontos de mínimas magnitudes das tensões e ângulos e para o restante das variáveis. Ao final fica-se com 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 FCN simulado previamente.

$$P_{kmax} = V_{kmax} \cdot \sum_{m \in K} V_{mmax} \cdot (G_{km} \cdot \cos(\theta_{kmmax}) + B_{km} \cdot \sin(\theta_{kmmax})) \quad (3.39)$$

Para obter os valores dos desvios (α) das variáveis, executa-se uma média aritmética, como na equação (3.40), novamente utilizando a potência ativa gerada nas barras de referência e PVs como exemplo.

$$\alpha_{P_{kmax}} = \frac{(|P_{kmax} - P_{kmédio}| + |P_{kmin} - P_{kmédio}|)}{2} \quad (3.40)$$

Repetindo-se a expressão anterior para todas as variáveis, obtém-se os valores de α para todas elas. Conseqüentemente formam-se as distribuições de possibilidades desejadas.

Capítulo 4

Fluxo de Carga Linearizado *Fuzzy*

Com o objetivo de obter estimativas dos fluxos de potência, seja em situações onde o Fluxo de Carga Newton não converge ou quando não há necessidade de resultados precisos em favor de uma maior rapidez na obtenção dos mesmos. O Fluxo de Carga Linearizado (FCL) é um recurso computacional muito útil. Por exemplo, em etapas preliminares de estudos de planejamento da expansão de redes elétricas e na análise de segurança. Assim sendo, neste capítulo é desenvolvida uma versão *fuzzy* do Fluxo de Carga Linearizado.

4.1 FCL - Método Convencional

Inicialmente, com base na metodologia do Fluxo de Carga Newton (FCN), que essencialmente corresponde à solução do conjunto de equações (4.1), é desenvolvida a formulação do FCL convencional, aplicando-se linearizações baseadas em série de Taylor [Monticelli et al., 1990] e inserindo-se algumas aproximações.

$$\begin{bmatrix} \underline{\Delta P} \\ \underline{\Delta Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{\Delta \theta} \\ \underline{\Delta V} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

onde:

$$H = \frac{\delta P}{\delta \theta} \quad N = \frac{\delta P}{\delta V} \quad M = \frac{\delta Q}{\delta \theta} \quad L = \frac{\delta Q}{\delta V}$$

H, N, M e L são as submatrizes que formam a matriz Jacobiana (J);

$\underline{\Delta P}$ e $\underline{\Delta Q}$ são os desvios de potência ativa e reativa nas barras;

$\Delta\theta$ e ΔV são os desvios dos ângulos e das magnitudes das tensões nas barras.

De (4.1) chega-se às expressões:

$$H \cdot \Delta\theta + N \cdot \Delta V = \Delta P \quad (4.2)$$

$$M \cdot \Delta\theta + L \cdot \Delta V = \Delta Q \quad (4.3)$$

ou ainda, de (4.2) tem-se:

$$\Delta\theta = H^{-1} \cdot \Delta P - H^{-1} \cdot N \cdot \Delta V \quad (4.4)$$

Substituindo (4.4) em (4.3) tem-se:

$$M \cdot (H^{-1} \cdot \Delta P - H^{-1} \cdot N \cdot \Delta V) + L \cdot \Delta V = \Delta Q \quad (4.5)$$

ou ainda:

$$L \cdot \Delta V - M \cdot H^{-1} \cdot N \cdot \Delta V = \Delta Q - M \cdot H^{-1} \cdot \Delta P \quad (4.6)$$

As expressões (4.2) e (4.5) podem ser agregadas na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} H & N \\ 0 & L - M \cdot H^{-1} \cdot N \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q - M \cdot H^{-1} \cdot \Delta P \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

ou ainda:

$$\begin{bmatrix} H & N \\ 0 & L_{eq} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q_H \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

sendo

$$L_{eq} = L - M \cdot H^{-1} \cdot N$$

$$\Delta Q_H = \Delta Q - M \cdot H^{-1} \cdot \Delta P$$

Assim, através das modificações executadas em (4.1), chega-se a uma representação diferente do sistema de equações do FCN. Semelhante procedimento pode ser aplicado em (4.1) para anular a matriz N .

Pode-se escrever (4.3) da seguinte maneira:

$$\Delta \underline{V} = L^{-1} \cdot \Delta \underline{Q} - L^{-1} \cdot M \cdot \Delta \underline{\theta} \quad (4.9)$$

Substituindo (4.9) em (4.2) tem-se:

$$H \cdot \Delta \underline{\theta} + N \cdot (L^{-1} \cdot \Delta \underline{Q} - L^{-1} \cdot M \cdot \Delta \underline{\theta}) = \Delta \underline{P} \quad (4.10)$$

ou ainda:

$$H \cdot \Delta \underline{\theta} - N \cdot L^{-1} \cdot M \cdot \Delta \underline{\theta} = \Delta \underline{P} - N \cdot L^{-1} \cdot \Delta \underline{Q} \quad (4.11)$$

Agregando (4.3) e (4.11) na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} H - N \cdot L^{-1} \cdot M & 0 \\ M & L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \underline{\theta} \\ \Delta \underline{V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \underline{P} - N \cdot L^{-1} \cdot \Delta \underline{Q} \\ \Delta \underline{Q} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

ou ainda:

$$\begin{bmatrix} H_{eq} & 0 \\ M & L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \underline{\theta} \\ \Delta \underline{V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \underline{P}_L \\ \Delta \underline{Q} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

sendo

$$H_{eq} = H - N \cdot L^{-1} \cdot M$$

$$\Delta \underline{P}_L = \Delta \underline{P} - N \cdot L^{-1} \cdot \Delta \underline{Q}$$

Caso fosse intenção desenvolver os métodos desacoplados, versões BX e XB, o próximo passo seria a aplicação de uma metodologia de linearização baseada em série de Taylor, como pode ser visto em [Monticelli et al., 1990].

No entanto, como o objetivo é chegar ao equacionamento do FCL, necessita-se fazer as seguintes hipóteses simplificadoras:

1. Normalmente têm-se valores pequenos para as diferenças entre os ângulos nodais (abertura angular), o que permite supor:

$$\cos \theta_{km} \approx 1 \quad (4.14)$$

2. Assume-se que, os *taps* dos transformadores e as magnitudes das tensões nas barras são aproximadamente unitários:

$$taps = 1, 0 \quad V_k \approx V_m \approx 1, 0 \text{ p.u.} \quad (4.15)$$

3. Geralmente, nas redes de transmissão tem-se:

$$r_{km} \ll x_{km} \quad (4.16)$$

onde r_{km} - resistência série e x_{km} - reatância série.

Isto possibilita simplificar os cálculos de g_{km} (condutância) e b_{km} (susceptância):

$$\begin{aligned} g_{km} &= \frac{r_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \approx 0 \\ b_{km} &= \frac{-x_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \approx -x_{km}^{-1} \end{aligned} \quad (4.17)$$

Utilizando estas hipóteses chega-se à seguinte formulação para as submatrizes da matriz Jacobiana:

$$\begin{aligned} H_{kk} &= \sum_{m \in \Omega_k} x_{km}^{-1} & H_{km} &= -x_{km}^{-1} \\ M_{kk} &= 0 & M_{km} &= 0 \\ N_{kk} &= 0 & N_{km} &= 0 \\ L_{kk} &= -2 \cdot B_{kk} + \sum_{m \in \Omega_k} -x_{km}^{-1} & L_{km} &= -x_{km}^{-1} \end{aligned} \quad (4.18)$$

onde Ω_k é o conjunto das barras vizinhas a barra k , incluindo a barra k .

Com as aproximações, B_{kk} corresponde a:

$$B_{kk} = \sum_{m \in \Omega_k} x_{km}^{-1} + \sum_{m \in \Omega_k} \text{shunts de linha} + \text{shunt de barra}$$

Substituindo estas expressões em (4.13), tem-se:

$$H'_{eq} \cdot \Delta \underline{\theta} = \Delta \underline{P}$$

sendo H'_{eq} formada por H_{kk} e H_{km} expressos em (4.18).

Chamando a matriz H'_{eq} de B' , chega-se à formulação matricial do FCL ([Monticelli, 1983]):

$$\underline{P} = B' \cdot \underline{\theta} \quad (4.19)$$

onde:

$\underline{\theta}$ - vetor dos ângulos nodais

$\underline{P}$ - vetor das injeções líquidas de potência ativa

B' - matriz do tipo admitância nodal cujos elementos são:

$$\begin{aligned} B'_{kk} &= \sum_{m \in \Omega_k} x_{km}^{-1} \\ B'_{km} &= -x_{km}^{-1} \end{aligned}$$

O fluxo de potência ativa em uma linha, com tais simplificações, é obtido por:

$$P_{km} \cong \frac{1}{x_{km}} \cdot \theta_{km} \quad (4.20)$$

Assim como para o FCN, deve-se escolher uma barra de referência angular para que a matriz B' deixe de ser singular e se possa calcular $(B')^{-1}$.

Desta forma, ao resolver o sistema (4.19) tem-se os ângulos nas barras e os fluxos de potência ativa nos ramos.

É possível, de forma aproximada, inserir as perdas de potência ativa na transmissão [Monticelli, 1983]:

i - obter as perdas através de:

$$P_{km}^{Perdas} = g_{km} \cdot \theta_{km}^2 \quad (4.21)$$

g_{km} - condutância série;

θ_{km} - primeira estimativa através de (4.19).

ii - adicionar metade dos valores das perdas nas respectivas injeções de potência ativa das barras terminais, obtendo um novo vetor $\underline{P}$.

iii - resolver (4.19) com o novo vetor $\underline{P}$.

Assim, tem-se uma estimativa dos ângulos nodais e também dos fluxos (expressão (4.20)) incluindo-se as perdas de potência ativa na transmissão.

4.2 FCLT - Fluxo de Carga Linearizado *Fuzzy* Trapezoidal

No intuito de incorporar a matemática com números nebulosos na estimativa dos ângulos nas barras do sistema, os autores do artigo [Miranda et al., 1994] desenvolveram uma metodologia para simular um FCL *fuzzy* e também um FCN *fuzzy*, visando obter resultados na forma de números nebulosos.

Inicialmente a potência ativa foi colocada na forma de uma distribuição de possibilidades trapezoidal, como pode ser visto na figura 4.1.

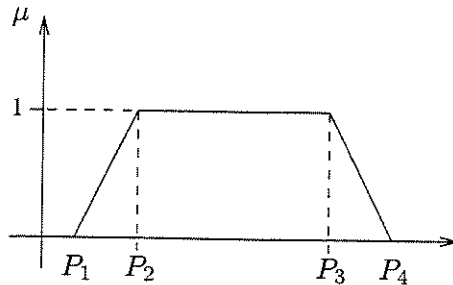


Figura 4.1: Função trapezoidal para a representação de um número nebuloso

Esta distribuição pode ser obtida de várias formas, como por exemplo, a partir de dados coletados com os operadores do sistema, tomando os valores máximos e mínimos que as

potências nas barras normalmente alcançam, ou para efeito de estudo, impondo uma variação percentual no valor da potência mais provável para a barra em questão.

A partir desta distribuição, são calculados os pontos médios e com estes valores é executado o FCL convencional obtendo os valores médios para as distribuições dos ângulos e dos fluxos de potência ativa, denominados determinísticos ou médios.

Em seguida, determinam-se os desvios de potência $\Delta\tilde{P}_i$ através das diferenças entre os valores médios de potência (P_{mk}) em uma barra e os respectivos valores de P_{k1} , P_{k2} , P_{k3} e P_{k4} , equação (4.22).

$$\Delta\tilde{P}_{kn} = P_{mk} - P_{kn} \quad (4.22)$$

onde

$k = 1, 2, \dots, nb$ (número de barras)

P_{mk} - ponto médio para a distribuição de possibilidades da potência ativa na barra k.

P_{kn} - ponto n ($n = 1, 2, 3, 4$) da distribuição de possibilidades da barra k.

De posse dos desvios, assim como descrito no item 2.3.1, formam-se as distribuições de possibilidades para os desvios das potências ativas e então utilizando a técnica de cortes de nível (item 2.1.3), obtém-se os intervalos ($I_{\alpha(0/1)}^P$, intervalo para a potência ativa) que são utilizados nos cálculos, lembrando que para cada corte de nível são necessários dois valores de desvios para formar o intervalo, como por exemplo para o corte de nível 1 tem-se o intervalo composto pelos desvios com relação aos pontos P_2 e P_3 .

Obtidos os intervalos para os cortes de nível 0 ($I_{\alpha(0)}^P$) e 1 ($I_{\alpha(1)}^P$), os autores aplicam a aritmética intervalar [Miranda, 1997] para obter os intervalos formados pelos desvios correspondentes aos ângulos e aos fluxos de potência ativa, como exposto na seqüência.

Para o cálculo dos intervalos dos desvios para os ângulos, faz-se a multiplicação da matriz B' do FCL convencional pelos intervalos $I_{\alpha(0)}^P$ e $I_{\alpha(1)}^P$, equação (4.23):

$$[I_{\alpha(0/1)}^\theta] = [B']^{-1} \cdot [I_{\alpha(0/1)}^P] \quad (4.23)$$

onde

$I_{\alpha(0/1)}^P$ - intervalos formados pelos desvios das potências ativas nas barras (para o corte de nível 0 [ΔP_{k1} ; ΔP_{k4}] e para o corte de nível 1 [ΔP_{k2} ; ΔP_{k3}]);

$I_{\alpha(0/1)}^\theta$ - intervalos formados pelos desvios para os ângulos nas barras (para o corte de nível 0 [$\Delta\theta_{k1}$; $\Delta\theta_{k4}$] e para o corte de nível 1 [$\Delta\theta_{k2}$; $\Delta\theta_{k3}$]).

De posse dos valores dos intervalos formados com os desvios para os ângulos nodais e dos valores médios para estes, previamente calculados com o FCL, pode-se substituí-los na equação (4.24), calculando os quatro valores necessários para definir a função trapezoidal relativa aos ângulos.

$$\theta_{kn} = \theta_k^{md} + \Delta\theta_{kn} \quad (4.24)$$

$k = 1, 2, \dots, nb$ (número de barras);

$n = 1, 2, 3, 4$

θ_k^{md} - ponto médio para o ângulo na barra k obtido a partir da simulação do FCL convencional ;

$\Delta\theta_{kn}$ - desvio obtido a partir dos intervalos calculados com a equação (4.23) para o ponto n na barra k ;

θ_{kn} - ponto n da distribuição de possibilidade do ângulo na barra k que caracteriza a função trapezoidal.

Para o cálculo dos fluxos de potência ativa, a metodologia é a mesma, mas utiliza-se outra matriz de sensibilidade para a obtenção dos desvios dos fluxos nos ramos. Esta matriz foi nomeada matriz A em [Miranda et al., 1994] e é obtida da seguinte forma:

$$A_j = \frac{1}{X_{ik}} \cdot ((B'_i)^{-1} - (B'_k)^{-1}) \quad (4.25)$$

onde

j - ramo do sistema, cujos nós terminais correspondem a 'i' e 'k';

$(B'_i)^{-1}$ - linha 'i' da matriz B^{-1} que não inclui a linha e a coluna correspondentes à barra de referência.

Com a matriz A e os intervalos formados pelos desvios das potências ativas calculam-se os intervalos formados pelos desvios para os fluxos:

$$[I_{\alpha(0/1)}^{FP}] = [A] \cdot [I_{\alpha(0/1)}^P] \quad (4.26)$$

onde

$I_{\alpha(0/1)}^{FP}$ são os intervalos formados pelos desvios para o fluxo de potência ativa nos ramos.

Com os intervalos calculados, obtém-se os fluxos na forma nebulosa:

$$FP_{ikn} = FP_{ik}^{md} + \Delta P_{ikn} \quad (4.27)$$

$k = 1, 2, \dots, nb$ (número de barras);

$n = 1, 2, 3, 4$;

FP_{ik}^{md} - ponto médio para o fluxo na linha ik , obtido a partir da simulação do FCL convencional;

ΔP_{ikn} - desvio obtido a partir dos intervalos calculados com a equação 4.26 para o ponto n na barra ik ;

FP_{ikn} - ponto n da distribuição de possibilidades do fluxo na linha ik que caracteriza a função trapezoidal.

Tem-se então os ângulos nas barras e os fluxos de potência ativa na forma de distribuições de possibilidades (forma trapezoidal).

4.3 FCLS - Fluxo de Carga Linearizado *Fuzzy* Sinusoidal

Novamente, procurando simplificar os cálculos na forma nebulosa, desenvolveu-se uma metodologia que trabalha com números nebulosos na forma de sino, mostrada novamente na figura 4.2.

Com a utilização desta função não é necessário o uso dos recursos de cortes de nível e da matemática intervalar, o que simplifica os cálculos. São utilizados os operadores mostrados no item 2.1.2.2 para executar os cálculos necessários na simulação do FCLS com os valores fornecidos no banco de dados (potências ativas nas barras e magnitudes das tensões que terão $m = 1$ e $\alpha = 0$; ângulos com $m = 0$ e $\alpha = 0$; e dados de linha considerados números reais) sem a necessidade de simular um FCL convencional.

Além desta função permitir os cálculos na forma nebulosa durante todo o processo de resolução do fluxo de carga, ela tem ainda a vantagem de necessitar de apenas dois valores para ser definida, o ponto de maior grau de pertinência (m) e o valor do desvio (α), enquanto que a função trapezoidal necessita de no mínimo quatro pontos.

No entanto, os cálculos com números nebulosos durante todo o processo de simulação do FCLS só foram possíveis devido às condições encontradas no equacionamento do FCL

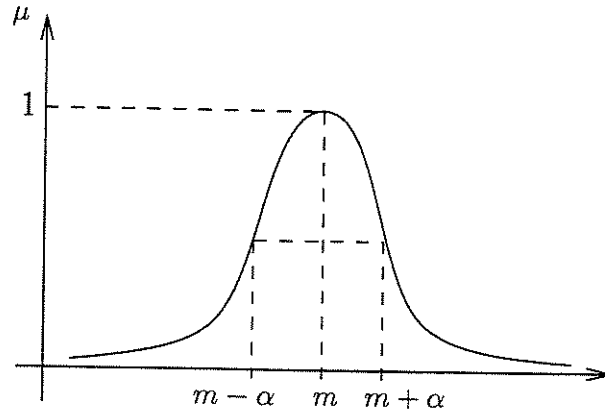


Figura 4.2: Função em forma de sino (sinusoidal)

que é a base para as expressões do FCLS. Tais condições referem-se ao fato das equações serem de certa forma simples, onde não são encontradas muitas multiplicações entre números nebulosos e também o fato de ter-se apenas duas iterações, uma para determinar a estimativa inicial dos ângulos e uma segunda para o cálculo dos ângulos considerando-se as perdas.

Para simular o FCLS estabeleceu-se o seguinte algoritmo:

- i - a partir dos dados da rede, formar a matriz B' do FCL;
- ii - resolver $\tilde{\theta} = B'^{-1} \otimes \tilde{P}$;
- iii - calcular $\tilde{P}_{km}^{Perdas} = g_{km} \otimes \tilde{\theta}_{km}^2$;

onde (m - pertence ao conjunto das barras vizinhas à barra k)

- iv - adicionar metade das perdas injeções das potências ativas das respectivas barras terminais;
- v - recalculer $\tilde{\theta} = B'^{-1} \otimes \tilde{P}$;
- vi - calcular os fluxos nos ramos $\tilde{P}_{km} = \frac{1}{x_{km}} \otimes (\tilde{\theta}_k \ominus \tilde{\theta}_m)$;
- vii - calcular a injeção de potência ativa na barra de referência: $\tilde{P}_k = x_{km}^{-1} \otimes \tilde{\theta}_{km}$.

($\otimes$ e $\ominus$ - multiplicação e subtração nebulosas definidas em 2.1.2.2.)

Com este algoritmo obtém-se todos os resultados na forma de números nebulosos.

Capítulo 5

Resolução de um exemplo prático

Para proporcionar uma visão global de como os algoritmos funcionam, é apresentada a resolução de um sistema de três barras e três ramos, passo a passo. Isto permite visualizar as etapas de resolução dos algoritmos descritos nos capítulos anteriores.

5.1 Sistema utilizado

A seguir estão mostrados os dados de barra, tabela 5.1, os dos ramos, tabela 5.2, e a malha do sistema, figura 5.1.

Tabela 5.1: Dados de barra do sistema

Barra	Tipo	P(p.u.)	Q(p.u.)	V(p.u.)	$\theta(graus)$
1	$V\theta$	-	-	1,0	0,0
2	PQ	-0,05	-0,02	-	-
3	PV	-0,15	-	0,98	-

Tabela 5.2: Dados dos ramos do sistema

Linha	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

Os valores para as potências são os valores líquidos: potência gerada menos potência de carga.

A partir de agora resolve-se o sistema para os diversos métodos, convencionais e propostos, tanto para o FCL quanto para o FCN.

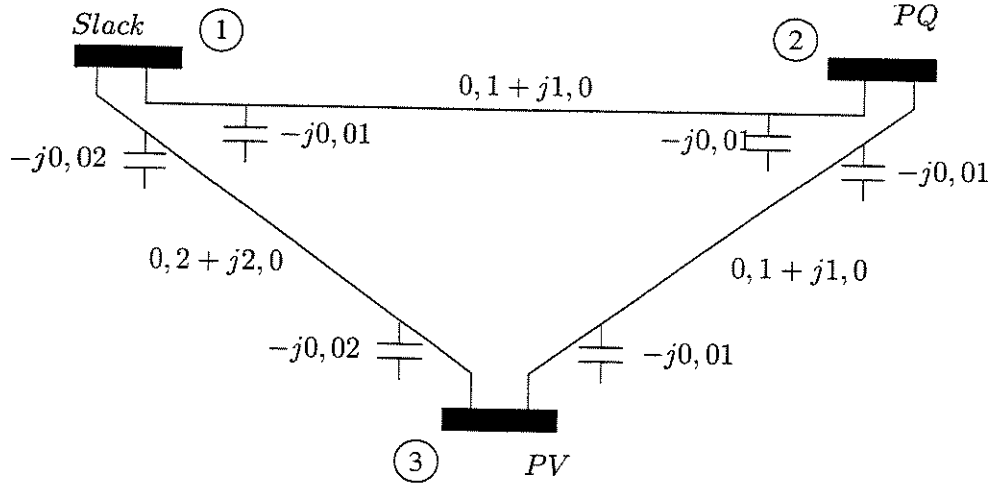


Figura 5.1: Sistema utilizado

5.2 Resolução pelo Fluxo de Carga Linearizado

5.2.1 FCL - Método Convencional

O primeiro passo é obter a matriz B' :

$$\begin{aligned} B'_{km} &= -x_{km}^{-1} \\ B'_{kk} &= \sum_{m \in \Omega_k} x_{km}^{-1} \end{aligned} \quad (5.1)$$

Utilizando os valores do sistema:

$$B' = \begin{bmatrix} -1,5 & 1,0 & 0,5 \\ 1,0 & -2,0 & 1,0 \\ 0,5 & 1,0 & -1,5 \end{bmatrix}$$

Como já indicado na figura 5.1, a barra 1 é barra de referência, então da matriz B' são excluídas a primeira linha e a primeira coluna:

$$B' = \begin{bmatrix} -2,0 & 1,0 \\ 1,0 & -1,5 \end{bmatrix}$$

Agora B' possui inversa. Utilizando esta matriz e o vetor das potências ativas $\underline{P}$, resolve-se o sistema matricial (5.2) obtendo a primeira estimativa para os ângulos nas barras.

$$\underline{\theta} = (B')^{-1} \cdot \underline{P} \quad (5.2)$$

$$\begin{bmatrix} \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,75 & -0,50 \\ -0,50 & -1,00 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -0,05 \\ -0,15 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,1125 \\ 0,1750 \end{bmatrix} rad$$

O ângulo da barra 1 é zero.

Para considerar as perdas na transmissão, efetuam-se os cálculos destas com os ângulos já obtidos, de acordo com a equação:

$$P_{km}^{Perdas} = g_{km} \cdot \theta_{km}^2$$

Adiciona-se agora, metade de cada perda às respectivas potências ativas nas barras terminais, considerando-as como cargas.

Tabela 5.3: Perdas ativas na transmissão (p.u.) Tabela 5.4: Novas potências ativas nas barras (p.u.)

Linha	Perdas
1-2	0,001253
1-3	0,001516
2-3	0,000387

Linha	Potência ativa
1	-
2	-0,050820
3	-0,150951

Resolvendo novamente o sistema (5.2) tem-se a estimativa final dos ângulos.

$$\begin{bmatrix} \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,75 & -0,50 \\ -0,50 & -1,00 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -0,050820 \\ -0,150951 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,1136 \\ 0,1764 \end{bmatrix} rad$$

Finalmente, são realizados os cálculos dos fluxos e da potência ativa gerada na barra 1 (referência).

$$P_{km} = x_{km}^{-1} \cdot \theta_{km} \quad (5.3)$$

$$P_k = \sum_{m \in \Omega_k} x_{km}^{-1} \cdot \theta_{km} + \frac{1}{2} \cdot \sum_{m \in \Omega_k} g_{km} \cdot \theta_{km}^2 \quad (5.4)$$

$$P_{g1} = 0,2013 \quad p.u.$$

5 Resolução de um exemplo prático

Tabela 5.5: Fluxos de potência ativa nos ramos (p.u.)

Linha	Fluxo de Potência
1-2	0,1129
1-3	0,0869
2-3	0,0630

5.2.2 FCLT - Fluxo de Carga Linearizado *Fuzzy* Trapezoidal

O primeiro passo para a resolução do exemplo pelo FCLT consiste em formar as distribuições de possibilidades cujos valores estão nas tabelas 5.6 e 5.7.

Tabela 5.6: Distribuições de possibilidades (forma trapezoidal) para potência ativa (p.u.)

Barra	Tipo	Potência gerada				Potência de Carga			
		P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4
1	Slack	-	-	-	-	0,0	0,0	0,0	0,0
2	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0465	0,0475	0,0525	0,0535
3	PV	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1395	0,1425	0,1575	0,1605

Tabela 5.7: Distribuições de possibilidades (forma trapezoidal) para potência reativa (p.u.)

Barra	Tipo	Potência gerada				Potência de carga			
		P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4
1	Slack	-	-	-	-	0,0	0,0	0,0	0,0
2	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0186	0,0190	0,0210	0,0214
3	PV	-	-	-	-	0,0	0,0	0,0	0,0

Para formar estas distribuições trapezoidais, estabeleceu-se uma variação percentual com relação aos valores expressos na tabela 5.1. Para cada grau de pertinência tem-se um percentual de variação diferente: para o valor de pertinência 1, ou seja, correspondente aos valores entre P_2 e P_3 tem-se um percentual de variação (5%) e para os valores de pertinência variando entre 0 e 1, valores entre P_1 e P_2 e entre P_3 e P_4 tem-se outro percentual de variação (7%), conforme expresso em (5.5).

$$\begin{aligned}
P_1 &= P_m - P_m * 0,07 \\
P_2 &= P_m - P_m * 0,05 \\
P_3 &= P_m + P_m * 0,05 \\
P_4 &= P_m + P_m * 0,07
\end{aligned} \tag{5.5}$$

onde P_m é o ponto médio da distribuição de possibilidades que corresponde ao valor dado na tabela 5.1.

As distribuições para a potência reativa, tabela 5.7, não são utilizadas no FCL, mas já foram definidas para a utilização no FCNT.

Em seguida, o método pede a resolução de um FCL convencional, utilizando os valores médios das distribuições de possibilidades obtém-se os valores para os ângulos e para os fluxos de potência:

$$\begin{bmatrix} \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,1136 \\ 0,1764 \end{bmatrix} rad$$

Tabela 5.8: Fluxos de potência ativa nos ramos (p.u.)

Linha	Fluxo de Potência
1-2	0,1129
1-3	0,0869
2-3	0,0630

O próximo passo é a determinação dos desvios das potências do banco de dados ($\Delta\tilde{P}_i$) com relação ao seu ponto médio, mostrados na tabela 5.9.

$$[\Delta\tilde{P}_k] = [P_{dk}] - [P_{kn}]$$

onde

$\Delta\tilde{P}_k$ - desvio da potência com relação ao ponto médio para a barra k;

P_{dk} - ponto médio da distribuição de possibilidades de potência ativa (tabela 5.6) para a barra k;

P_{kn} - ponto n ($n = 1, 2, 3$ e 4) da distribuição de possibilidades de potência ativa (tabela 5.6) para a barra k.

Tabela 5.9: Desvios de potência ativa (p.u.)

Barra	Desvios de Potência Ativa			
	P_1	P_2	P_3	P_4
2	-0,0035	-0,0025	0,0025	0,0035
3	-0,0105	-0,0075	0,0075	0,0105

O passo seguinte é o cálculo dos desvios dos ângulos para obter as distribuições trapezoidais destes e para isto é utilizada a matriz B' calculada no FCL, obtendo-se as tabelas 5.10 e 5.11.

$$[\Delta\tilde{\theta}] = [B]^{-1} \cdot [\Delta\tilde{P}]$$

Tabela 5.10: Desvios para os ângulos (rad)

Barra	Desvios para os ângulos			
	P_1	P_2	P_3	P_4
2	-0,007875	-0,005625	0,005625	0,007875
3	-0,012250	-0,008750	0,008750	0,012250

$$[\tilde{\theta}_k] = \underline{\theta}_{dk} + [\Delta\tilde{\theta}_k]$$

Tabela 5.11: Ângulos (rad) nas barras

Barra	Ângulos			
	P_1	P_2	P_3	P_4
2	0,10463	0,10688	0,11813	0,12038
3	0,16275	0,16625	0,18375	0,18725

O cálculo dos desvios para os fluxos nos ramos exige um esforço maior, já que se necessita formar a matriz A que estabelece a sensibilidade entre as potências nas barras e os fluxos.

$$A_j = \frac{1}{X_{ik}} \cdot (B_i^{-1} - B_k^{-1})$$

$$[A] = \begin{bmatrix} 0,75 & 0,50 \\ 0,50 & 1,00 \\ -0,25 & 0,50 \end{bmatrix}$$

Formada a matriz A , é possível o cálculo dos desvios para os fluxos, tabela 5.12, e a obtenção das respectivas distribuições de possibilidades, tabela 5.13.

$$[\Delta \widetilde{P}_{ik}] = [A] \cdot [\Delta \widetilde{P}]$$

Tabela 5.12: Desvios para o fluxo ativo (p.u.)

Linha	Desvios para o fluxo ativo			
	P_1	P_2	P_3	P_4
1-2	-0,007875	-0,005625	0,005625	0,007875
1-3	-0,012250	-0,008750	0,008750	0,012250
2-3	-0,004375	-0,003125	0,003125	0,004375

$$[\widetilde{P}_{ik}] = [P] + [\Delta \widetilde{P}_{ik}]$$

Tabela 5.13: Fluxo ativo (p.u.) nos ramos

Linha	Fluxo ativo			
	P_1	P_2	P_3	P_4
1-2	0,10503	0,10728	0,11853	0,12078
1-3	0,07465	0,07815	0,09565	0,08815
2-3	0,58625	0,05988	0,06613	0,06738

No artigo onde esta metodologia foi apresentada, [Miranda et al., 1994], os autores não descrevem de forma explícita uma maneira para o cálculo das perdas ativas nos ramos e da potência ativa gerada na barra de referência, sendo este o motivo de não serem apresentados os valores para as perdas na transmissão e para a potência gerada na barra de referência para o FCLT. No artigo, os autores apenas indicam a forma e o equacionamento para se obter os ângulos nas barras e os fluxos de potência ativa nos ramos.

5.2.3 FCLS - Fluxo de Carga Linearizado *Fuzzy* Sinusoidal

Como o FCLS trabalha com a função sinusoidal para representar números nebulosos, deve-se adequar as distribuições de possibilidades para as potências nas barras. As distribuições de possibilidades, tabelas 5.14 e 5.15, necessitam apenas de dois pontos para serem descritas:

5 Resolução de um exemplo prático

Tabela 5.14: Distribuições de possibilidades (sinusoidal) para potência ativa (p.u.)

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 5.15: Distribuições de possibilidades (sinusoidal) para potência reativa (p.u.)

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

o ponto médio da distribuição (m) e o seu desvio (α), sendo esta uma vantagem com relação à distribuição trapezoidal que necessita de no mínimo quatro pontos para ser definida.

Para o FCLS não há necessidade de simular um FCL para o ponto médio das distribuições como feito anteriormente no método proposto em [Miranda et al., 1994]. Utilizam-se as operações na forma nebulosa, sendo possível o cálculo direto dos ângulos e dos fluxos na forma nebulosa.

As distribuições de possibilidades dos ângulos são obtidas através de (5.6).

$$\tilde{\theta} = B'^{-1} \otimes \tilde{P} \quad (5.6)$$

onde $\otimes$ é uma multiplicação nebulosa.

Assim, obtém-se a primeira estimativa para os ângulos e os resultados obtidos fornecem tanto o valor de maior probabilidade (m) quanto o desvio (α), tabela 5.16, já que os cálculos foram executados com os números nebulosos e utilizando as operações descritas no item 2.1.2.2.

Em seguida, através da expressão 5.7 é possível o cálculo das perdas, tabela 5.17.

$$\tilde{P}^{Perdas} = g_{km} \cdot \tilde{\theta}_{km}^2 \quad (5.7)$$

Após adicionar metade das perdas (como cargas) às respectivas potências ativas nas barras terminais, pode-se obter os valores finais dos ângulos, tabela 5.18, resolvendo (5.6):

Tabela 5.16: Ângulos (rad) nas barras

Barra	Ângulos	
	m	α
2	-0,1125	0,0079
3	-0,1750	0,0122

Tabela 5.17: Perdas ativas (p.u.) nos ramos

Linha	Perdas	
	m	α
1-2	0,0013850	0,0001871
1-3	0,0008199	0,0001108
2-3	0,0009514	0,0001285

Tabela 5.18: Ângulos (rad) finais nas barras

Barra	Ângulos	
	m	α
2	0,1136	0,00802
3	0,1764	0,01243

5 Resolução de um exemplo prático

Calcula-se agora a potência gerada na barra de referência:

$$\tilde{P}_k = \sum_{k \in \Omega_K} x_{km}^{-1} \cdot \tilde{\theta}_{km}$$

$$\tilde{P}_1 = (0, 2000; 0, 01399) p.u.$$

E por fim, calculam-se os fluxos, tabela 5.19, também utilizando operações nebulosas:

$$\tilde{P}_{km} = \frac{1}{x_{km}} \cdot \tilde{\theta}_k - \tilde{\theta}_m$$

Tabela 5.19: Fluxo ativo (p.u.) nos ramos

Linha	Fluxo ativo	
	m	α
1-2	0,1125	0,0079
1-3	0,0875	0,0061
2-3	0,0625	0,0044

5.3 Resolução pelo Fluxo de Carga Newton

5.3.1 FCN - Fluxo de Carga Newton Convencional

A tolerância utilizada para simular o FCN foi de 0,0001 p.u. e os dados são os já apresentados.

O primeiro passo para iniciar o cálculo dos ângulos e das tensões pelo FCN é obter a matriz admitância do sistema.

$$\begin{aligned} Y_{mk} = Y_{km} &= -a_{km} \cdot y_{km} \\ Y_{kk} &= j b_k^{sh} + \sum_{m \in \Omega_k} (j b_{km}^{sh} + a_{km}^2 \cdot y_{km}) \\ Y &= G + jB \end{aligned} \quad (5.8)$$

$$G = \begin{bmatrix} 0,1485148 & -0,0990099 & -0,0495049 \\ -0,0990099 & 0,1980198 & -0,0990099 \\ -0,0495049 & -0,0990099 & 0,1485148 \end{bmatrix} p.u. \quad (5.9)$$

$$B = \begin{bmatrix} -1,4551485 & 0,990099 & 0,4950495 \\ 0,9900990 & -1,960198 & 0,9900990 \\ 0,4950495 & 0,990099 & -1,4551485 \end{bmatrix} p.u.$$

Com a matriz admitância e com os dados iniciais, pode-se executar o próximo passo que é o cálculo das potências e dos erros destas, para o primeiro teste de convergência.

$$\begin{aligned} P_k &= V_k \cdot \sum_{m \in K} V_m \cdot (G_{km} \cdot \cos(\theta_{km}) + B_{km} \cdot \text{sen}(\theta_{km})) \\ Q_k &= V_k \cdot \sum_{m \in K} V_m \cdot (G_{km} \cdot \text{sen}(\theta_{km}) - B_{km} \cdot \cos(\theta_{km})) \end{aligned} \quad (5.10)$$

$$\begin{aligned} \Delta P &= P^{esp} - P(V, \theta) \\ \Delta Q &= Q^{esp} - Q(V, \theta) \end{aligned} \quad (5.11)$$

Calculando as potências e os erros tem-se:

$$\begin{aligned} P_2^0 &= -0,0019802 \text{ p.u.} & \Delta P_2^0 &= -0,05198012 \text{ p.u.} \\ P_3^0 &= -0,0029106 \text{ p.u.} & \Delta P_3^0 &= -0,14708940 \text{ p.u.} \\ Q_2^0 &= -0,0001980 \text{ p.u.} & \Delta Q_2^0 &= -0,01980198 \text{ p.u.} \end{aligned}$$

Como os valores dos erros estão acima da tolerância, inicia-se o processo iterativo com o cálculo dos desvios dos ângulos e dos desvios das tensões para efetuar a correção destas variáveis.

- primeira iteração

$$\begin{bmatrix} \Delta \underline{\theta}^1 \\ \Delta \underline{V}^1 \end{bmatrix} = [J(0)]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \underline{P}^0 \\ \Delta \underline{Q}^0 \end{bmatrix}$$

Calculando J e resolvendo o sistema anterior, obtém-se os valores de correção para as magnitudes das tensões e para os ângulos (tabela 5.20):

$$J(0) = \begin{bmatrix} 1,96039 & -0,97029 & 0,19998 \\ -0,97029 & 1,45539 & -0,09702 \\ -0,19602 & 0,09702 & 1,96000 \end{bmatrix}$$

5 Resolução de um exemplo prático

Tabela 5.20: Correção para ângulos e magnitudes das tensões

Barra	Correção em ângulo (rad)	Correção em tensão (p.u.)
2	-0,1130146	-0,0012626
3	-0,1773667	-

$$[J(0)]^{-1} = \begin{bmatrix} 0,7561171 & 0,5075616 & -0,0520228 \\ 0,5074602 & 1,0254486 & -0,0010149 \\ 0,0505002 & -0,0000002 & 0,5050515 \end{bmatrix}$$

Obtém-se o novo estado do sistema somando os valores das correções aos valores iniciais das variáveis, tabela 5.21.

Tabela 5.21: Ângulos e magnitudes das tensões

Barra	Ângulos (rad)	Tensão (p.u.)
2	-0,1130146	0,9873737
3	-0,1773667	-

Repetindo os cálculos necessários para executar novamente o teste de convergência:

$$\begin{aligned} P_2^1 &= -0,0483296 \text{ p.u.} & \Delta P_2^1 &= -0,00167036 \text{ p.u.} \\ P_3^1 &= -0,1479262 \text{ p.u.} & \Delta P_3^1 &= -0,00207375 \text{ p.u.} \\ Q_2^1 &= -0,0115502 \text{ p.u.} & \Delta Q_2^1 &= -0,00844980 \text{ p.u.} \end{aligned}$$

Não satisfazendo os critérios de convergência, faz-se uma segunda iteração.

- segunda iteração

Nova matriz jacobiana:

$$J(1) = \begin{bmatrix} 1,92256 & -0,96222 & 0,14655 \\ -0,94990 & 1,41883 & -0,15922 \\ -0,24136 & 0,03398 & 1,92375 \end{bmatrix}$$
$$[J(1)]^{-1} = \begin{bmatrix} 0,77959 & 0,52907 & -0,01559 \\ 0,53185 & 1,06436 & 0,04758 \\ 0,08842 & 0,04757 & 0,51702 \end{bmatrix}$$

Tabela 5.22: Correção para ângulos e magnitudes das tensões

Barra	Correção em ângulo (rad)	Correção em tensão (p.u.)
2	-0,0022675	-0,0046151
3	-0,0034975	-

Calculam-se os desvios para os ângulos e as tensões, tabela 5.22:

E obtém-se o novo estado do sistema, tabela 5.23:

Tabela 5.23: Ângulos e magnitudes das tensões

Barra	Ângulos (rad)	Tensão (p.u.)
2	-0,1152821	0,9827586
3	-0,1808643	-

Testa-se a convergência:

$$\begin{aligned}
 P_2^2 &= -0,0499905 \text{ p.u.} & \Delta P_2^2 &= -0,0000094 \text{ p.u.} \\
 P_3^2 &= -0,1499936 \text{ p.u.} & \Delta P_3^2 &= -0,0000064 \text{ p.u.} \\
 Q_2^2 &= -0,0199571 \text{ p.u.} & \Delta Q_2^2 &= -0,0000429 \text{ p.u.}
 \end{aligned}$$

Com a tolerância satisfeita, o processo iterativo convergiu e finaliza-se com o cálculo das potências reativas nas barras de referência e PV e da potência ativa na barra de referência, tabela 5.24, dos fluxos de potência nos ramos e das perdas na transmissão, tabela 5.25, de acordo com as expressões do item 4.1.

Tabela 5.24: Potências ativa e reativa (p.u.)

Barra	P_g	Q_g
1	0,203318	-0,008576
3	0,149993	-0,016255

5.3.2 FCNT - Fluxo de Carga Newton *Fuzzy* Trapezoidal

Inicialmente deve-se obter o estado do sistema resolvendo um FCN convencional para os valores médios das distribuições de possibilidades (tabelas 5.6 e 5.7). Este passo já foi

Tabela 5.25: Fluxos de potência ativa e reativa e perdas na transmissão (p.u.)

Linha km	P_{km}	P_{mk}	Q_{km}	Q_{mk}	Perdas
1-2	0,114273	-0,112952	-0,002336	-0,008784	0,001321
1-3	0,089045	-0,087443	-0,010913	-0,012272	0,001602
2-3	0,062961	-0,062550	-0,011173	-0,003983	0,000411

executado no item anterior, onde foram obtidos os resultados determinísticos de V_d , θ_d , P_{dik} , Q_{dik} , P_g , Q_g e P_{kmd}^{perdas} .

O próximo passo é o cálculo dos desvios referentes às potências ativa e reativa com relação aos seus respectivos valores determinísticos, tabela 5.26, como feito para o FCL fuzzy.

$$[\Delta \tilde{Z}] = [\tilde{Z}] - [Z_d]$$

Tabela 5.26: Desvios das potências (p.u.)

Barra	Desvio de potência ativa				Desvio de potência reativa			
	P_1	P_2	P_3	P_4	P_1	P_2	P_3	P_4
2	-0,0035	-0,0025	0,0025	0,0035	-0,0014	-0,0010	0,0010	0,0014
3	-0,0105	-0,0075	0,0075	0,0105	-	-	-	-

Os pontos P_1 , P_2 , P_3 e P_4 nas tabelas referem-se aos pontos utilizados para representar o trapézio e portanto não se deve associá-los à potência ativa.

Utilizando a matriz Jacobiana obtida na última iteração do FCN e $\Delta \tilde{Z}$, calculam-se os desvios para as magnitudes e ângulos das tensões nas barras, tabela 5.27, e as distribuições de possibilidades destas variáveis, tabela 5.28.

$$\begin{aligned} [\Delta \tilde{X}] &= [J]^{-1} \cdot [\Delta \tilde{Z}] \\ [\tilde{X}] &= [X_d] + [\Delta \tilde{Z}] \end{aligned} \quad (5.12)$$

$$[J(1)]^{-1} = \begin{bmatrix} 0,77959 & 0,52907 & -0,01559 \\ 0,53185 & 1,06436 & 0,04758 \\ 0,08842 & 0,04757 & 0,51702 \end{bmatrix}$$

De posse das distribuições de possibilidades para os ângulos e magnitudes das tensões, efetuam-se os cálculos para obter as distribuições de possibilidades dos fluxos de potência

Tabela 5.27: Desvios para as magnitudes e os ângulos das tensões nas barras

Barra	Desvios para os ângulos (rad)				Desvios para as tensões (p.u.)			
	P_1	P_2	P_3	P_4	P_1	P_2	P_3	P_4
2	-0,0083	-0,0059	0,0059	0,0083	-0,0015	-0,0011	0,0011	0,0015
3	-0,0131	-0,0094	0,0094	0,0131	-	-	-	-

Tabela 5.28: Magnitudes e ângulos das tensões nas barras

Barra	Ângulos (rad)				Tensões (p.u.)			
	P_1	P_2	P_3	P_4	P_1	P_2	P_3	P_4
2	-0,1236	-0,1212	-0,1094	-0,1069	0,9812	0,9817	0,9839	0,9843
3	-0,1939	-0,1902	-0,1715	-0,1678	-	-	-	-

nos ramos, utilizando o método de linearização em série de Taylor descrito no item 4.2. São obtidas as derivadas parciais, tanto para o fluxo ativo como para o reativo:

- fluxo ativo:

$$\begin{array}{lll}
\frac{\delta P_{12}}{\delta V_1} = 0,2133 & \frac{\delta P_{13}}{\delta V_1} = 0,1386 & \frac{\delta P_{23}}{\delta V_2} = 0,1614 \\
\frac{\delta P_{12}}{\delta V_2} = 0,0155 & \frac{\delta P_{13}}{\delta V_3} = 0,0403 & \frac{\delta P_{23}}{\delta V_3} = -0,0333 \\
\frac{\delta P_{12}}{\delta \theta_1} = 0,9778 & \frac{\delta P_{13}}{\delta \theta_1} = 0,4860 & \frac{\delta P_{23}}{\delta \theta_2} = 0,9578 \\
\frac{\delta P_{12}}{\delta \theta_2} = -0,9778 & \frac{\delta P_{13}}{\delta \theta_3} = -0,4860 & \frac{\delta P_{23}}{\delta \theta_3} = -0,9578
\end{array}$$

- fluxo reativo:

$$\begin{array}{lll}
\frac{\delta Q_{12}}{\delta V_1} = 0,9554 & \frac{\delta Q_{13}}{\delta V_1} = 0,4685 & \frac{\delta Q_{23}}{\delta V_2} = 0,9619 \\
\frac{\delta Q_{12}}{\delta V_2} = -0,9511 & \frac{\delta Q_{13}}{\delta V_3} = -0,4744 & \frac{\delta Q_{23}}{\delta V_3} = -0,9633 \\
\frac{\delta Q_{12}}{\delta \theta_1} = -0,2086 & \frac{\delta Q_{13}}{\delta \theta_1} = -0,1350 & \frac{\delta Q_{23}}{\delta \theta_2} = -0,1576 \\
\frac{\delta Q_{12}}{\delta \theta_2} = 0,2086 & \frac{\delta Q_{13}}{\delta \theta_3} = 0,1350 & \frac{\delta Q_{23}}{\delta \theta_3} = 0,1576
\end{array}$$

5 Resolução de um exemplo prático

Com as derivadas calculadas, o próximo passo é o cálculo dos desvios para os fluxos, tabela 5.29, utilizando também as distribuições de possibilidades das magnitudes das tensões e dos ângulos nas barras, e então obtém-se as distribuições de possibilidades dos fluxos, tabela 5.30.

Tabela 5.29: Desvios para os fluxos ativo e reativo (p.u.)

Linha	Desvios para o fluxo ativo				Desvios para o fluxo reativo			
	P_1	P_2	P_3	P_4	P_1	P_2	P_3	P_4
1-2	-0,0081	-0,0058	0,0058	0,0081	-0,0017	-0,0012	0,0012	0,0017
1-3	-0,0064	-0,0045	0,0045	0,0045	-0,0005	-0,0004	0,0004	0,0005
2-3	-0,0208	-0,0148	0,0148	0,0208	-0,0022	-0,0016	0,0016	0,0022

$$\tilde{P}_{ik} = P_{dik} + \Delta \tilde{P}_{ik}$$

Tabela 5.30: Fluxos ativo e reativo (p.u.) nos ramos

Linha	Fluxo ativo				Fluxo reativo			
	P_1	P_2	P_3	P_4	P_1	P_2	P_3	P_4
1-2	0,1061	0,1085	0,1201	0,1224	-0,0017	-0,0012	0,0012	0,0017
1-3	0,0827	0,0845	0,0936	0,0954	0,0827	0,0845	0,0936	0,0954
2-3	0,0422	0,0481	0,0778	0,0837	0,0422	0,0481	0,0778	0,0837

Para o cálculo das potências geradas utiliza-se o mesmo artifício das linearizações em série de Taylor. São apresentados apenas os desvios (tabela 5.31) e as distribuições de possibilidades (tabela 5.32), omitindo os valores calculados para as derivadas parciais.

Tabela 5.31: Desvios para as potências ativa e reativa (p.u.) (barras PV e referência)

Barra	Desvios para potência ativa				Desvios para potência reativa			
	P_1	P_2	P_3	P_4	P_1	P_2	P_3	P_4
1	-0,0145	-0,0104	0,0104	0,0145	-0,0022	-0,0015	0,0015	0,0022
3	-	-	-	-	-0,0104	-0,0074	0,0074	0,0104

Resta o cálculo das perdas nos ramos que apresenta um pouco mais de dificuldade, como descrito no item 4.2. Calculando a matriz S:

Tabela 5.32: Potências ativa e reativa (p.u.) (barras PV e de referência)

Barra	Potência ativa				Potência reativa			
	P_1	P_2	P_3	P_4	P_1	P_2	P_3	P_4
1	0,1888	0,1930	0,2137	0,2178	-0,0107	-0,0101	-0,0070	-0,0064
3	-	-	-	-	-0,0266	-0,0237	-0,0089	-0,0059

$$[S] = [D] \cdot [J]^{-1}$$

$$D = \begin{bmatrix} 1,92256 & -0,96222 & 0,14655 \\ -0,94990 & 1,41883 & -0,15922 \\ -0,24136 & 0,03398 & 1,92375 \end{bmatrix}$$

$$[J(1)]^{-1} = \begin{bmatrix} 0,77959 & 0,52907 & -0,01559 \\ 0,53185 & 1,06436 & 0,04758 \\ 0,08842 & 0,04757 & 0,51702 \end{bmatrix}$$

$$S = \begin{bmatrix} 1,92256 & -0,96222 & 0,14655 \\ -0,94990 & 1,41883 & -0,15922 \\ -0,24136 & 0,03398 & 1,92375 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{P}_{perdasik} = P_{perdasdik} + \sum_j S_j \cdot \Delta \tilde{Z}_j$$

Tabela 5.33: Perdas na transmissão (p.u.)

Linha	Perdas			
	P_1	P_2	P_3	P_4
1-2	0,1247	0,1277	0,1366	0,1395
1-3	0,1485	0,1532	0,1673	0,1719
2-3	0,0353	0,0376	0,0446	0,0469

5.3.3 FCNS - Fluxo de Carga Newton *Fuzzy* Sinusoidal

Para simular o FCNS são utilizadas as mesmas distribuições de possibilidades mostradas nas tabelas 5.14 e 5.15. Como já foi citado no item 4.3, tem-se que recorrer ao artifício de simular um FCN convencional, com os valores médios das distribuições de possibilidades, que para a função sinusoidal corresponde ao ponto m .

5.3.3.1 Metodologia utilizando os operadores nebulosos

Como indicado no item 4.3.1, para a simulação utilizando os operadores nebulosos necessita-se de simular o FCN até o momento do cálculo das magnitudes e dos ângulos nas barras. Como isto já foi executado no item 5.3.1 repete-se os valores obtidos (tabela 5.34).

Tabela 5.34: Resultados para tensões e ângulos com o FCN

Barra	V(p.u.)	$\theta(rad)$
1	1,0000	0,0000
2	0,9828	-0,1153
3	0,9800	-0,1809

Estes são os valores de m das distribuições de possibilidades para os ângulos e as magnitudes das tensões.

Para o cálculo dos desvios destas grandezas deve-se primeiro obter os desvios das injeções líquidas das potências, como descrito no item 4.3.1.

$$\begin{aligned}\alpha_{Pliq1} &= 0,0035 \\ \alpha_{Pliq3} &= 0,0105 \\ \alpha_{Qliq2} &= 0,0014\end{aligned}\tag{5.13}$$

De posse destes desvios, toma-se a inversa da Jacobiana construída na última iteração do FCN e a multiplicamos por estes desvios, obtendo-se os desvios para as magnitudes e os ângulos das barras, tabela 5.35, obtendo as distribuições de possibilidades na forma sinusoidal destas variáveis (5.36).

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

Determinam-se agora os fluxos nos ramos (tabela 5.37 e tabela 5.38) executando os cálculos com as expressões (5.14) e (5.15).

Tabela 5.35: Desvios para magnitudes e ângulos das tensões para o FCNF

Barra	Desvios para ângulos (rad)	Desvios para tensões (p.u.)
	α_θ	α_V
2	0,008262	0,001533
3	0,013104	-

Tabela 5.36: Tensões e ângulos nas barras para o FCNS

Barra	Ângulos (rad)		Tensões (p.u.)	
	m	α	m	α
2	-0,1153	0,00826	0,9828	0,00154
3	-0,1809	0,01310	-	-

$$\begin{aligned}
\tilde{P}_{km} &= \tilde{V}_k^2 \otimes g_{km} \ominus \tilde{V}_k \otimes \tilde{V}_m \otimes (g_{km} \otimes \cos(\tilde{\theta}_{km}) \oplus b_{km} \otimes \sin(\tilde{\theta}_{km})) \\
\tilde{P}_{mk} &= \tilde{V}_m^2 \otimes g_{km} \otimes tap_{km}^2 \ominus tap_{km} \otimes \tilde{V}_k \otimes \tilde{V}_m \otimes (g_{km} \otimes \cos(\tilde{\theta}_{km}) \ominus b_{km} \otimes \sin(\tilde{\theta}_{km}))
\end{aligned} \tag{5.14}$$

Tabela 5.37: Fluxo ativo (p.u.) nos ramos

Linha km	Fluxo P_{km}		Fluxo P_{mk}	
	m	α	m	α
1-2	0,1143	0,0081	-0,1130	0,0076
1-3	0,0890	0,0064	-0,0874	0,0061
2-3	0,0630	0,0044	-0,0626	0,0043

$$\begin{aligned}
\tilde{Q}_{km} &= \tilde{V}_k^2 \otimes (b_{km} \oplus b_{km}^{sh}) \ominus \tilde{V}_k \otimes \tilde{V}_m \otimes (g_{km} \otimes \sin(\tilde{\theta}_{km}) \ominus b_{km} \otimes \cos(\tilde{\theta}_{km})) \\
\tilde{Q}_{mk} &= \tilde{V}_m^2 \otimes (b_{km} \oplus b_{km}^{sh}) \otimes tap_{km}^2 \ominus tap_{km} \otimes \tilde{V}_k \otimes \tilde{V}_m \otimes (g_{km} \otimes \sin(\tilde{\theta}_{km}) \oplus b_{km} \otimes \cos(\tilde{\theta}_{km}))
\end{aligned} \tag{5.15}$$

Segue-se a mesma maneira de cálculo para as potências geradas (tabela 5.39), através das expressões (5.16) e para as perdas nos ramos (tabela 5.40), por meio de (5.17).

Tabela 5.38: Fluxo reativo (p.u.) nos ramos

Linha km	Fluxo Q_{km}		Fluxo Q_{mk}	
	m	α	m	α
1-2	0,00237	0,0017	-0,00875	0,0003
1-3	-0,01087	0,0005	-0,01223	0,0018
2-3	-0,01116	0,0013	-0,00397	0,0022

$$\begin{aligned}
\tilde{P}_k &= \tilde{V}_k \cdot \sum_{m \in K} \tilde{V}_m \cdot (G_{km} \cdot \cos(\tilde{\theta}_{km}) + B_{km} \cdot \text{sen}(\tilde{\theta}_{km})) \\
\tilde{Q}_k &= \tilde{V}_k \cdot \sum_{m \in K} \tilde{V}_m \cdot (G_{km} \cdot \text{sen}(\tilde{\theta}_{km}) - B_{km} \cdot \cos(\tilde{\theta}_{km}))
\end{aligned} \tag{5.16}$$

Tabela 5.39: Potências ativa e reativa (p.u.) geradas nas barras

Barra	Ativa		Reativa	
	m	α	m	α
1	0,2033	0,01446	-0,0086	0,002168
3	-	-	-0,0162	0,002150

$$\begin{aligned}
\tilde{P}_{km}^{Perdas} &= g_{km} \otimes \tilde{V}_k^2 + g_{km} \otimes \tilde{V}_m^2 \otimes \text{tap}_{km}^2 - 2 \otimes \text{tap}_{km}^2 \otimes \tilde{V}_k \otimes \\
&\quad \otimes \tilde{V}_m \otimes g_{km} \otimes \cos \text{fuzzy}(\theta_{km})
\end{aligned} \tag{5.17}$$

Tabela 5.40: Perdas na transmissão (p.u.)

Linha km	Perdas	
	m	α
1-2	0,001328	0,00000188
1-3	0,001611	0,00000229
2-3	0,000413	0,00000059

5.3.4 Metodologia discreta

A resolução para este método é idêntica à do FCNS até o momento em que são calculadas as distribuições de possibilidades para as magnitudes e os ângulos das tensões, sendo que é

necessário que seja executada a simulação completa do FCN convencional para serem obtidos os valores dos fluxos de potência, das perdas na transmissão e das potências nas barras, que serão os respectivos valores de m para estas variáveis.

Após isto, o próximo passo a ser efetuado é o cálculo dos indicadores que informam como as tensões e os ângulos se comportam, ou seja se aumentam ou diminuem com o aumento das potências.

Para isto, obtém-se os vetores com os desvios $\Delta \underline{P}_{sinal}$ e $\Delta \underline{Q}_{sinal}$ (tabela 5.41).

$$\Delta P_{sinal} = (P_{gerespec} + \alpha_{Pgerespec}) - (P_{cargaespec} + \alpha_{Pcargaespec}) - P_{calcatual} \quad (5.18)$$

Tabela 5.41: Vetores dos desvios (p.u.)

Barra	ΔP_{sinal}	ΔQ_{sinal}
	m	α
1	-	-
2	- 0,003509	- 0,001443
3	- 0,010506	-

Em seguida efetuam-se os cálculos que fornecem os indicadores (tabela 5.42) e compara-se com a convenção descrita no item 4.3.2 e ordenam-se os valores das variáveis:

$$\begin{bmatrix} \alpha_{\theta sinal} \\ \alpha_{v sinal} \end{bmatrix} = [J]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \underline{P} \\ \Delta \underline{Q} \end{bmatrix} \quad (5.19)$$

Tabela 5.42: Indicadores para as magnitudes e ângulos das tensões

Barra	$\alpha_{\theta sinal}(rad)$	$\alpha_{v sinal}(p.u.)$
	m	α
1	-	-
2	- 0,008272	- 0,001556
3	- 0,013118	-

De uma análise inadequada da tabela 5.43 pode-se inferir que esta pareça incoerente, pois ao se olhar os valores das tensões, nota-se que o maior valor de tensão está rotulado como mínimo e o menor como máximo. Na verdade, o *min* na tabela refere-se ao mínimo carregamento do sistema e o *max* ao máximo carregamento. O mesmo valendo para as tabelas que são apresentadas na sequência.

Tabela 5.43: Magnitudes e ângulos das tensões nas barras para o FCNS

Barra	Ângulos (rad)		Tensões (p.u.)	
	min	max	min	max
2	-0,1070	-0.1235	0,9843	0,9812
3	-0,1678	-0.1940	-	-

Após ordenar os ângulos e as magnitudes das tensões (estipular qual é o valor mínimo e qual é o máximo para estas variáveis), utilizam-se estes valores para calcular os valores mínimos e máximos para as outras variáveis do fluxo de carga (fluxo de potência ativa e reativa nos ramos, potências geradas nas barras de referência e PV's e perdas de potência ativa nos ramos).

Tabela 5.44: Fluxo ativo (p.u.) mínimos e máximos nos ramos

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

Tabela 5.45: Fluxo reativo (p.u.) mínimos e máximos nos ramos

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

Com os valores máximos e mínimos e os valores médios das variáveis, calculam-se os desvios (equação 5.20) e obtém-se as distribuições de possibilidades para os fluxos nos ramos (tabelas 5.48 e 5.49), as perdas na transmissão (tabela 5.50) e as potências geradas nas barras (tabela 5.51).

Tabela 5.46: Potências ativa e reativa (p.u.) mínimas e máximas nas barras

Barra km	Potência ativa		Potência reativa	
	min	max	min	max
1	0,1888	0,2177	-0,0107	-0,0063
3	-	-	-0,0202	-0,0122

Tabela 5.47: Perdas (p.u.) mínimas e máximas na transmissão

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

Devido o exemplo ser um sistema pequeno, de três barras, não é possível notar muitas diferenças entre os resultados do FCNS e do FCNS *discreto*. No entanto para sistemas com maior número de barras e linhas pode-se notar a diferença entre os resultados.

$$\alpha_{P_{kmax}} = \frac{(|P_{kmax} - P_{kmédio}| + |P_{kmin} - P_{kmédio}|)}{2} \quad (5.20)$$

Tabela 5.48: Fluxo ativo (p.u.) nos ramos

Linha km	Fluxo P_{km}		Fluxo 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 5.49: Fluxo reativo (p.u.) nos ramos

Linha km	Fluxo Q_{km}		Fluxo 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 5.50: Perdas na transmissão (p.u.)

Linha km	Perdas	
	m	α
1-2	0,001321	0,00000188
1-3	0,001602	0,00000229
2-3	0,000411	0,00000059

Tabela 5.51: Potências ativa e reativa (p.u.) nas barras

Barra km	Potência ativa		Potência reativa	
	m	α	m	α
1	0,2033	0,01442	-0,0086	0,002197
3	-	-	-0,0163	0,004006

Capítulo 6

Resultados e comentários

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos para os métodos desenvolvidos neste trabalho e os obtidos com os fluxos *fuzzy* propostos em [Miranda et al., 1994]. Ambos são comparados com os resultados obtidos com os fluxos de carga convencionais, os quais são supostos exatos.

6.1 Dados de entrada nebulosos

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

Os ângulos e as magnitudes das tensões não foram considerados nebulosos, já que não é possível efetuar o processo iterativo com os operadores nebulosos devido à propagação de erros que ocorre. Os dados do sistema, impedâncias dos ramos, *shunt's*, valores de *tap* de transformadores, etc não foram considerados nebulosos. Isto implicava em ter-se uma matriz *Y* com valores nebulosos e com isto a inversão desta matriz não seria possível ou exigiria um esforço computacional muito grande.

Com isto os dados de entrada nebulosos são somente as potências nas barras.

6.2 Banco de dados

Na metodologia proposta em [Miranda et al., 1994], utiliza-se a função trapezoidal para representar um número nebuloso enquanto que para os métodos propostos neste trabalho foi implementada a função sinusoidal. Necessitando-se de diferentes bancos de dados, com relação ao número de dados presentes nestes bancos, para efetuar as simulações. No entanto

estes devem ser coerentes para permitir uma adequada comparação dos resultados.

Geralmente, os dados relativos a redes elétricas, com poucas exceções, estão na forma determinística. Devido a este fato foi necessário foi estabelecida uma variação percentual, com relação aos valores determinísticos, para gerar bancos de dados nebulosos.

Como a função trapezoidal necessita de quatro pontos para ser definida, então com relação ao ponto determinístico das variáveis (ao qual chamou-se de m), foram estabelecidos os quatro pontos (Z_1 , Z_2 , Z_3 e Z_4) do trapézio (lembrando que estes desvios se referem às potências ativa e reativa do banco de dados):

$$\begin{aligned} Z_1 &= m - 0,07 \cdot m \\ Z_2 &= m - 0,05 \cdot m \\ Z_3 &= m + 0,05 \cdot m \\ Z_4 &= m + 0,07 \cdot m \end{aligned} \tag{6.1}$$

No entanto, considerou-se que as barras PV possuem condições de monitoramento para as potências, que são os dados considerados como nebulosos, permitindo assim estreitar esta faixa, ficando-se com as seguintes porcentagens:

$$\begin{aligned} Z_1 &= m - 0,05 \cdot m \\ Z_2 &= m - 0,03 \cdot m \\ Z_3 &= m + 0,03 \cdot m \\ Z_4 &= m + 0,05 \cdot m \end{aligned} \tag{6.2}$$

Para a função sinusoidal, são necessários apenas dois pontos para que esta seja definida:

- o ponto central, que é o próprio valor determinístico (m) e um desvio que para as barras PV e de referência, corresponde a:

$$\alpha = 0,03 \cdot m \tag{6.3}$$

- para as barras que são PQ:

$$\alpha = 0,05 \cdot m \tag{6.4}$$

Para os fluxos convencionais foram simulados os quatro pontos da função trapezoidal mais o ponto correspondente a m , ou seja foram simulados cinco fluxos convencionais, já que se tem cinco condições de carregamento: Z_1 , Z_2 , m , Z_3 e Z_4 . Para o FCL simulou-se apenas os quatro pontos pertencentes ao trapézio.

6.3 Forma de comparação

Os resultados obtidos com os fluxos de carga convencionais, tanto o FCL quanto o FCN, foram supostos exatos. Compara-se, então, os resultados dos fluxos *fuzzy* com estes.

A comparação foi feita entre os valores obtidos com os fluxos nebulosos correspondentes aos pontos Z_2 e Z_3 para a função trapezoidal, e respectivamente $m - \alpha$ e $m + \alpha$ para a função sinusoidal e com duas simulações do FCL ou FCN para carregamentos do sistema correspondentes a Z_2 e Z_3 .

Adotou-se os pontos Z_2 e Z_3 para se efetuar as comparações entre os fluxos de carga devido estes pontos, para a função trapezoidal, possuírem a mesma variação percentual dos pontos $m + \alpha$ e $m - \alpha$ para a função sinusoidal.

6.4 Convenções utilizadas e erro

6.4.1 Convenção utilizada para o FCL

Para simplificar a apresentação dos resultados em tabelas, estabeleceu-se algumas convenções:

FCL: resultado fornecido pelo FCL convencional, sendo apresentados os dois pontos utilizados para efetuar as comparações (Z_2 e Z_3);

FCLT: resultado fornecido pelo método FCL *fuzzy* proposto em [Miranda et al., 1994], sendo apresentados os dois pontos utilizados para efetuar a comparação (Z_2 e Z_3);

FCLS: resultado fornecido pelo método de FCL *fuzzy* proposto neste trabalho, sendo apresentados dois pontos: o máximo e o mínimo da distribuição em forma de sino ($Z_{m-\alpha}$, $P_{m+\alpha}$).

6.4.2 Convenção utilizada para o FCN

FCN: resultado fornecido pelo FCN convencional, sendo apresentados os mesmos pontos que foram apresentados no FCL;

FCNT: resultado fornecido pelo método de FCN *fuzzy* proposto em [Miranda et al., 1994], sendo apresentados os pontos Z_2 e Z_3 ;

FCNS: resultado fornecido pelo método de FCN *fuzzy* proposto neste trabalho, sendo apresentados os mesmos pontos que para o FCLS;

FCNSdis: resultado fornecido pelo método de FCN *fuzzy* discreto proposto neste trabalho.

6.4.3 Erro

O tipo de erro ($E\%$) adotado é relacionado ao valor exato da grandeza a ser comparada, ou seja em relação ao valor apresentado pelos fluxos de carga convencionais.

$$E\% = \frac{X_{FCL/FCN} - X_{(FCLT/FCNT)/(FCLS/FCNS)}}{X_{FCL/FCN}} \cdot 100\%$$

onde:

$X_{FCL/FCN}$ - resultado fornecido pelo FCL ou FCN convencional;

$X_{FCNT/FCNS}$ - resultado fornecido pelo fluxo proposto em [Miranda et al., 1994] ou pelo fluxo proposto neste trabalho.

As tabelas apresentadas na sequência trazem amostras dos resultados obtidos. Caso fossem colocados os resultados completos este capítulo se tornaria muito longo. Nos apêndices pode-se encontrar os resultados completos para o sistema IEEE30.

As tabelas são apresentadas com os resultados dos três fluxos (FCL, FCLT e FCLS ou FCN, FCNT e FCNS) e sempre da sequência das tabelas com os resultados são mostradas tabelas com os erros referentes a variável para a qual foram mostrados os resultados.

São apresentados amostras dos resultados, que permitam estabelecer conclusões sobre estes, já que a colocação dos resultados em sua totalidade tornaria este tópico muito grande.

6.5 Resultados para os fluxos linearizados

Nos fluxos linearizados são mostrados os resultados para os ângulos nas barras, os fluxos de potência ativa, a potência ativa gerada na barra de referência e as perdas na transmissão. O FCLT não possui uma maneira de se calcular a potência gerada na barra de referência e nem as perdas na transmissão, sendo esta a causa de não mostrar-se estes resultados para este fluxo.

6.5.1 Resultados obtidos para o sistema 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 um sistema muito utilizado em simulações de fluxo de carga.

6.5.1.1 Ângulos nas barras

Os ângulos mostrados na sequência são apenas os das barras que são extremidades dos ramos para as quais são apresentados os fluxos.

Tabela 6.1: Ângulos (graus) para o IEEE30

Barra	FCL		FCLS		FCLT	
	Z_2	Z_3	$m - \alpha$	$m + \alpha$	Z_2	Z_3
1	0	0	0	0	0	0
2	-5,4971	-5,9886	-5,4631	-6,0217	-5,4188	-6,066
3	-8,2258	-8,9798	-8,205	-8,9995	-8,1588	-9,0457
5	-14,2628	-15,4101	-14,2322	-15,4393	-14,0702	-15,6013
7	-13,2287	-14,3709	-13,2001	-14,3981	-13,088	-14,5102
8	-12,1617	-13,239	-12,1346	-13,2648	-12,045	-13,3543
12	-15,6585	-17,1567	-15,6326	-17,181	-15,5697	-17,2439
14	-16,7057	-18,3127	-16,6798	-18,3372	-16,6165	-18,4005
15	-16,8461	-18,4664	-16,8201	-18,4909	-16,7561	-18,5549
16	-16,3384	-17,9026	-16,3122	-17,9272	-16,2467	-17,9928
18	-17,5086	-19,1953	-17,4824	-19,2199	-17,4168	-19,2855
20	-17,4097	-19,0826	-17,3833	-19,1074	-17,3161	-19,1746
24	-17,4446	-19,1189	-17,4181	-19,1438	-17,35	-19,212
25	-16,9808	-18,6019	-16,9541	-18,627	-16,8844	-18,6967
28	-12,1155	-13,2093	-12,0884	-13,235	-12,0092	-13,3142

Tabela 6.2: Erros (%) dos ângulos com relação ao FCL

Barra	FCLS		FCLT	
	$m - \alpha$	$m + \alpha$	Z_2	Z_3
1	0	0	0	0
2	0,6185	0,5527	1,4244	1,2925
3	0,2529	0,2194	0,8145	0,7339
5	0,2145	0,1895	1,3504	1,2407
7	0,2162	0,1893	1,0636	0,9693
8	0,2228	0,1949	0,9596	0,8709
12	0,1654	0,1416	0,5671	0,5083
14	0,1550	0,1338	0,5339	0,4794
15	0,1543	0,1327	0,5342	0,4792
16	0,1604	0,1374	0,5613	0,5038
18	0,1496	0,1282	0,5243	0,4699
20	0,1516	0,1300	0,5376	0,4821
24	0,1519	0,1302	0,5423	0,4870
25	0,1572	0,1349	0,5677	0,5096
28	0,2237	0,1946	0,8774	0,7941

A tabela 6.1 mostra os ângulos nas barras, pode-se constatar que tanto para o FCLS quanto para o FCLT os valores destes estão próximos dos resultados obtidos com as duas simulações do FCL, mas pela tabela 6.2 observa-se que os erros do FCLS são inferiores aos do FCLT, ressaltando-se que este fato ocorre para os ângulos em todas as barras, mesmo as que não foram citadas nestas tabelas.

6.5.1.2 Fluxo ativo nos ramos

Na tabela 6.3 estão os resultados para o fluxo ativo em dez ramos do sistema IEEE30, onde o ramo 8-28 é um transformador, o que não deveria influenciar muito para o caso dos fluxos linearizados, mas irá necessitar de cuidado especial para os fluxos Newton.

Como pode ser visto na tabela 6.4, que traz os erros para os fluxo ativo nos ramos, o FCLS trabalha muito melhor do que o FCLT, onde nota-se que para o ramo 8-28, que é um transformador, o erro em comparação com o FCL chega a ser de 132,28%, enquanto que para o FCLS os erros estão abaixo de 0,63%, mesmo para os ramos os quais não foram apresentados os resultados.

Tabela 6.3: Fluxo ativo (MW) para o IEEE30

Linha	FCL		FCLS		FCLT	
	Z_2	Z_3	$m - \alpha$	$m + \alpha$	Z_2	Z_3
1 2	166,8566	181,7762	165,824	182,7806	164,4813	184,1232
1 3	77,1507	82,9224	77,1814	82,888	76,0981	83,9713
2 5	-15,5587	-15,6357	-15,6658	-15,5289	-12,2103	-18,9843
5 7	5,9723	6,5517	5,9696	6,5542	5,5415	6,9824
12 16	1,2268	1,3432	1,226	1,3439	1,725	0,8448
14 15	5,2921	5,8218	5,2906	5,8232	4,8736	6,2402
15 18	0,9092	0,9713	0,9075	0,9729	0,2423	1,6381
23 24	-2,4587	-2,741	-2,4599	-2,7401	-1,7388	-3,4612
24 25	-0,4035	-0,2596	-0,4033	-0,2601	-0,7472	0,0838
8 28	166,8566	181,7762	165,824	182,7806	164,4813	184,1232

Tabela 6.4: Erros (%) para o fluxo ativo

Linha	FCLS		FCLT	
	$m - \alpha$	$m + \alpha$	Z_2	Z_3
1 2	0,618855	-0,55255	1,423558	-1,29115
1 3	0,253481	-0,2192	0,81501	-0,73358
2 5	-0,03979	0,041485	1,364343	-1,26492
5 7	0,191533	-0,19251	21,52108	-21,4164
12 16	0,045209	-0,03816	7,213301	-6,57387
14 15	0,06521	-0,05211	-40,6097	37,10542
15 18	0,028344	-0,02405	7,908014	-7,18678
23 24	0,186978	-0,16473	73,3502	-68,6503
24 25	-0,04881	0,032835	29,2797	-26,2751
8 28	0,049566	-0,1926	-85,1797	132,2804

6.5.1.3 Potência ativa na barra de referência e perdas na transmissão

No artigo [Miranda et al., 1994] não é apresentada uma forma para o cálculo da potência ativa na barra de referência e as perdas ativas na transmissão. Devido a este fato, as próximas tabelas são apresentadas em uma forma um pouco diferente das tabelas anteriores. Estas tabelas apresentam os resultados para o FCL, o FCLS e os erros do FCLS com relação ao FCL, não havendo a necessidade de duas tabelas, como anteriormente.

A tabela 6.5 apresenta os resultados obtidos para potência ativa gerada, onde se nota que os erros são baixos (inferiores a 1,72%).

Tabela 6.5: Potência ativa (MW) e erro (%) para o IEEE30

Barra	FCL		FCLS		Erro (%)	
	Z_2	Z_3	$m - \alpha$	$m + \alpha$	$m - \alpha$	$m + \alpha$
1	244,377	266,4022	243,1479	267,5921	1,71246	1,538379

Na tabela 6.6 constata-se que para as perdas, em alguns ramos do sistema em teste, os erros são bons, inferiores a 3 %. Obteve-se um erro um pouco mais elevado para os ramos onde o valor das perdas é muito baixo, como no ramo 8-28, onde as perdas são de 1 kW, sendo esta pequena quando comparada a outras perdas presentes no sistema, como para 1-2, onde a perdas ativas são de 4,81 MW.

Tabela 6.6: Perdas ativas na transmissão (MW) e erro (%) para o IEEE30

Linha	FCL		FCLS		Erro (%)	
	Z_2	Z_3	$m - \alpha$	$m + \alpha$	$m - \alpha$	$m + \alpha$
1 2	4,80930	5,70780	4,7499	5,7462	1,2345	0,6725
1 3	2,56360	3,05510	2,5506	3,0565	0,5079	0,0459
2 5	2,65880	3,07150	2,6609	3,0617	0,0802	0,3193
5 7	0,09620	0,09720	0,0959	0,0975	0,3596	0,3574
12 16	0,02750	0,03310	0,0275	0,0330	0,1291	0,3767
14 15	0,00150	0,00180	0,0015	0,0018	0,4513	0,7156
15 18	0,02420	0,02930	0,0242	0,0292	0,0067	0,3657
23 24	0,00090	0,00100	0,0009	0,0010	2,5167	0,6170
24 25	0,00860	0,01070	0,0086	0,0106	0,1197	0,9079
8 28	0,00010	0,00000	8,8E-05	3,91E-05	11,9800	0,0000

6.5.2 Resultados obtidos para o sistema de Oporto

Este sistema foi utilizado para efetuar testes por ser o sistema teste em [Miranda et al., 1994]. O sistema possui treze barras e quatorze ramos e como os dados não apresentam valores para os taps dos transformadores, adotou-se então tap unitário. Este sistema é utilizado somente para testar os fluxos linearizados, para os fluxos Newton preferiu-se utilizar sistemas com maior número de barras e ramos.

Os dados utilizados nas simulações são mostrados nas tabelas B.1, B.2 e B.3 que estão nos apêndices, onde estão colocados os pontos necessários para a definição da distribuição trapezoidal, devido os dados deste sistema não serem facilmente encontrados, como os dados dos outros sistemas utilizados.

6.5.2.1 Ângulos nas barras

Novamente os resultados para os ângulos (tabela 6.7), são apenas os das barras que são extremidades dos ramos para as quais são mostrados os fluxos.

Tabela 6.7: Ângulos (graus) para o sistema de Oporto

Barra	FCL		FCLS		FCLT	
	Z_2	Z_3	$m - \alpha$	$m + \alpha$	Z_2	Z_3
1	0	0	0	0	0	0
2	-0,5101	-0,7019	-0,4650	-0,7470	-0,4004	-0,8169
3	-4,5512	-5,1476	-4,6889	-5,0088	-4,6033	-5,1542
4	-0,7155	-0,9845	-0,6522	-1,0478	-0,5616	-1,1457
5	-4,3415	-5,1062	-4,3749	-5,0715	-4,2981	-5,1629
6	-8,2968	-9,5794	-8,4843	-9,3871	-8,4019	-9,5029
7	-8,4783	-9,8175	-8,6528	-9,6402	-8,5706	-9,7461
9	-8,5479	-9,8756	-8,7397	-9,6787	-8,6573	-9,7931
10	-8,4738	-9,7921	-8,6624	-9,5987	-8,5801	-9,7123

Para este sistema os métodos não se comportaram tão bem quanto para o IEEE30, os erros, tabela 6.8, aumentaram, mas ainda são inferiores a 10% para o FCLS e chegam a 21% com o FCNT.

6.5.2.2 Fluxo ativo nos ramos

A tabela 6.9 traz os fluxos para alguns ramos do sistema, onde os erros, tabela 6.10, aumentaram e isto deve-se diretamente ao aumento dos erros nos ângulos, já que os fluxos

Tabela 6.8: Erros (%) para os ângulos com relação ao FCL

Barra	FCLS		FCLT	
	$m - \alpha$	$m + \alpha$	Z_2	Z_3
1	0	0	0	0
2	8,8414	-6,4254	21,5056	-16,3841
3	-3,0256	2,6964	-1,1448	-0,1282
4	8,8470	-6,4297	21,5094	-16,3738
5	-0,7693	0,6796	0,9997	-1,1104
6	-2,2599	2,0074	-1,2668	0,7986
7	-2,0582	1,8060	-1,0887	0,7273
9	-2,2438	1,9938	-1,2798	0,8354
10	-2,2257	1,9751	-1,2545	0,8149

ativos dependem diretamente destes.

Tabela 6.9: Fluxo ativo (MW) para o sistema de Oporto

Linha	FCL		FCLS		FCLT	
	Z_2	Z_3	$m - \alpha$	$m + \alpha$	Z_2	Z_3
2 4	31,1532	42,8649	28,3987	45,621	24,4488	49,8898
3 6	116,8215	138,2216	118,3721	136,5548	116,1766	137,9282
5 7	144,2787	164,3159	149,2011	159,3421	146,2442	162,6147
9 10	-17,16	-19,3277	-18,5159	-17,883	-21,7944	-14,7861
1 3	317,7339	359,3677	327,3466	349,6802	321,3693	359,8283
4 5	158,2167	179,8427	162,4334	175,5681	160,7583	177,5619

6.5.2.3 Potência ativa na barra de referência e perdas na transmissão

A tabela 6.11 apresenta os resultados obtidos para potência ativa gerada, notando-se que os erros são novamente baixos (inferiores a 1,97%).

A tabela 6.12 apresenta as perdas para alguns ramos do sistema em teste, os erros não são tão bons quanto os apresentados para o IEEE30. Mas os ramos com maiores perdas, que são os que atraem maior atenção possuem erros menores. Isto pode ser devido, novamente, ao aumento dos erros nos ângulos.

Os resultados obtidos com os fluxos linearizados são considerados bons, principalmente porque sua principal utilização é em planejamento da expansão, onde desejam-se estimativas.

Tabela 6.10: Erros (%) para o fluxo ativo

Linha	FCLS		FCLT	
	$m - \alpha$	$m + \alpha$	Z_2	Z_3
2 4	8,841788	-6,42974	21,52074	-16,3885
3 6	-1,32732	1,20589	0,552039	0,212268
5 7	-3,41173	3,026974	-1,36229	1,035323
9 10	-7,90152	7,474764	13,83392	-12,7625
1 3	-3,02539	2,695707	-1,14416	-0,12817
4 5	-2,66514	2,376855	-1,6064	1,268219

Tabela 6.11: Potência ativa (MW) e erro (%) para o sistema de Oporto

Barra	FCL		FCLS		Erro (%)	
	Z_2	Z_3	$m - \alpha$	$m + \alpha$	$m - \alpha$	$m + \alpha$
1	348,8936	402,2449	355,7506	395,3142	-1,96536	1,723005

Tabela 6.12: Perdas ativas (MW) na transmissão e erro (%) para o sistema de Oporto

Linha	FCL		FCLS		Erro (%)	
	Z_2	Z_3	$m - \alpha$	$m + \alpha$	$m - \alpha$	$m + \alpha$
2 4	0,0137	0,026	0,01142	0,027372	16,63898	-5,27815
3 6	0,9399	1,3159	0,965057	1,27292	-2,67655	3,266199
5 7	1,2821	1,6629	1,371046	1,560589	-6,93751	6,152542
6 10	0,0446	0,0644	0,045186	0,062912	-1,31446	2,310823
6 8	0,0595	0,0808	0,06168	0,077536	-3,66457	4,039196

Para o sistema IEEE30, para o qual os dados são confiáveis o FCNS trabalha muito bem mostrando sua eficiência, já para sistema de Oporto, [Miranda et al., 1994], este não trabalha tão bem mas os erros encontrados estão em sua maioria abaixo de 10%.

6.6 Resultados para os fluxos Newton

Agora são mostrados os resultados obtidos para o FCNS desenvolvido neste trabalho e os obtidos para o FCNT e estes são comparados com os resultados obtidos a partir do FCN.

6.6.1 Resultados obtidos para o sistema IEEE30

A seguir têm-se os resultados para as simulações com os fluxos Newton, utilizando o sistema IEEE30.

6.6.1.1 Magnitude das tensões nas barras

As magnitudes apresentadas na tabela 6.13 correspondem às barras que são extremidades dos ramos para as quais são apresentados os fluxos.

Não houve alteração nas magnitudes das tensões das barras 1, 2, 5 e 8 devido a estas serem barras de tensão controlada (PV).

Tabela 6.13: Tensões (p.u.) para o IEEE30

Barra	FCN		FCNS		FCNT	
	Z_2	Z_3	$m - \alpha$	$m + \alpha$	Z_2	Z_3
1	1,0600	1,0600	1,0600	1,0600	1,0600	1,0600
2	1,0430	1,0430	1,0430	1,0430	1,0430	1,0430
3	1,0232	1,0207	1,0232	1,0207	1,0233	1,0206
4	1,0147	1,0120	1,0148	1,0121	1,0148	1,0120
5	1,0100	1,0100	1,0100	1,0100	1,0100	1,0100
6	1,0133	1,0112	1,0133	1,0112	1,0133	1,0112
7	1,0046	1,0025	1,0046	1,0025	1,0047	1,0025
8	1,0100	1,0100	1,0100	1,0100	1,0100	1,0100
25	1,0231	1,0155	1,0232	1,0155	1,0232	1,0155
27	1,0289	1,0226	1,0289	1,0226	1,0290	1,0225
28	1,0121	1,0097	1,0121	1,0098	1,0122	1,0097

Tabela 6.14: Erros (%) das tensões

Barra	FCNS		FCNT	
	$m - \alpha$	$m + \alpha$	Z_2	Z_3
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	-0,00977	0,009797
4	-0,00986	-0,00988	-0,00986	0
5	0	0	0	0
6	0	0	0	0
7	0	0	-0,00995	0
8	0	0	0	0
25	-0,00977	0	-0,00977	0
27	0	0	-0,00972	0,009779
28	0	-0,0099	-0,00988	0

Os erros para as magnitudes das tensões, tabela 6.14, são muito baixos e este fato irá se repetir para os outros testes executados em sistemas diversos. Isto permitire a aplicação do FCNS em um controle que utilize lógica nebulosa, como proposto no Capítulo 7. A função trapezoidal também apresenta baixos erros, no entanto esta não permite tal aplicação devido não haver variação no valor do grau de pertinência para o intervalo entre Z_2 e Z_3 onde o valor da pertinência é constante e igual a 1, sendo que a função sinusoidal tem esta variação (de 0,5 a 1,0).

6.6.1.2 Ângulos nas barras

Os ângulos das barras, tabela 6.15, estão dentro dos valores esperados, o que pode ser visto na tabela 6.16, onde os respectivos erros são baixos, não tanto quanto os obtidos para as magnitudes das tensões. Para este caso, o FCNS trabalhou melhor do que o FCNT, onde os erros para o primeiro são inferiores a 0,1% e para o segundo estão abaixo de 2,13%.

6.6.1.3 Fluxo ativo nos ramos

Com relação ao fluxo ativo nos ramos, tabela 6.17, obteve-se resultados considerados bons, pois os erros, tabela 6.18, estão abaixo de 5,40% para o FCNS e 6,3% para o FCNT, considerando todos os ramos do sistema. A “vantagem” do FCNS é que este erro é para um valor de pertinência $\mu = 0,5$ e para o FCNT este valor de pertinência é $\mu = 1$.

Tabela 6.15: Ângulos (graus) para o IEEE30

Barra	FCN		FCNS		FCNT	
	Z_2	Z_3	$m - \alpha$	$m + \alpha$	Z_2	Z_3
1	0	0	0	0	0	0
2	-5,246	-5,755	-5,248	-5,751	-5,135	-5,864
3	-7,631	-8,366	-7,632	-8,364	-7,524	-8,472
4	-9,208	-10,102	-9,209	-10,098	-9,078	-10,229
5	-13,791	-14,996	-13,793	-14,992	-13,544	-15,241
6	-10,900	-11,948	-10,901	-11,944	-10,744	-12,100
7	-12,587	-13,753	-12,588	-13,748	-12,387	-13,950
8	-11,572	-12,706	-11,573	-12,702	-11,408	-12,866
25	-15,969	-17,606	-15,968	-17,600	-15,796	-17,772
27	-15,447	-17,032	-15,446	-17,027	-15,287	-17,186
28	-11,533	-12,644	-11,534	-12,640	-11,372	-12,802

Tabela 6.16: Erros (%) dos ângulos com relação ao FCN

Barra	FCNS		FCNT	
	$m - \alpha$	$m + \alpha$	Z_2	Z_3
1	0	0	0	0
2	-0,0400	0,0695	2,1158	-1,8958
3	-0,0118	0,0347	1,4100	-1,2622
4	-0,0098	0,0356	1,4129	-1,2611
5	-0,0080	0,0300	1,7960	-1,6284
6	-0,0083	0,0343	1,4248	-1,2730
7	-0,0072	0,0320	1,5929	-1,4324
8	-0,0052	0,0346	1,4163	-1,2608
25	0,0044	0,0329	1,0802	-0,9434
27	0,0032	0,0329	1,0358	-0,9036
28	-0,0069	0,0332	1,3960	-1,2464

Tabela 6.17: Fluxo ativo (MW) para o IEEE30

Linha	FCN		FCNS		FCNT	
	Z_2	Z_3	$m - \alpha$	$m + \alpha$	Z_2	Z_3
1 2	170,0062	185,7847	170,071	185,6627	166,5604	189,1654
1 3	79,4465	86,8366	79,5988	86,6711	78,3811	87,8865
2 4	43,4613	47,6086	43,8252	47,237	43,2609	47,7998
3 4	74,6084	81,2604	74,6322	81,235	73,6753	82,1904
2 5	79,9413	86,2024	79,9321	86,1973	78,711	87,4169
2 6	59,3643	64,8492	59,6047	64,5977	58,9285	65,2711
4 6	68,9819	74,4595	68,8013	74,6409	68,016	75,4252
5 7	-14,2132	-14,0538	-14,2136	-14,0594	-13,6071	-14,6659
6 8	28,5673	30,5487	28,5081	30,6051	28,2652	30,8476
25 27	-4,7499	-5,3195	-5,0666	-5,0041	-5,3986	-4,6721
8 28	-0,6281	-0,4645	-0,6284	-0,4652	-0,6108	-0,4828

Tabela 6.18: Erros (%) do fluxo ativo

Linha	FCNS		FCNT	
	$m - \alpha$	$m + \alpha$	Z_2	Z_3
1 2	-0,03812	0,065667	2,026867	-1,81969
1 3	-0,1917	0,190588	1,341028	-1,20905
2 4	-0,8373	0,780531	0,4611	-0,40161
3 4	-0,0319	0,031258	1,250663	-1,14447
2 5	0,011508	0,005916	1,539004	-1,40889
2 6	-0,40496	0,387823	0,734111	-0,65059
4 6	0,261808	-0,24362	1,400222	-1,29695
5 7	1,082093	-1,13706	4,264346	-4,35541
6 8	0,20723	-0,18462	1,057503	-0,97844
25 27	-5,35169	4,754206	1,637929	-1,48698
8 28	-0,04776	-0,1507	2,754338	-3,93972

6.6.1.4 Fluxo reativo nos ramos

Para os fluxos de potência reativa, tabela 6.19, ocorreram erros um pouco maiores em determinados ramos, porém estes são ramos com fluxos reduzidos ou onde possa ocorrer uma variação muito grande de fluxo do valor mínimo para o máximo, como no ramo 6-10 onde o fluxo máximo ($m + \alpha$) corresponde a aproximadamente sete vezes o fluxo mínimo ($m - \alpha$).

O maior erro encontrado foi de 13%, no ramo já citado, 6-10, onde o fluxo reativo varia de 0,109MW à 0,7941MW e somente neste ramo e no ramo 4-6, o erro é superior a 5% nas demais o erro é inferior, com erros muito baixos. Já para o FCNT o maior erro foi de 42,6% no ramo 6-10, mas ele também apresenta erros mais elevados para outros ramos, não mostrando um desempenho tão bom quanto para o fluxo ativo.

Tabela 6.19: Fluxo reativo (MVar) para o IEEE30

Linha	FCN		FCNS		FCNT	
	Z_2	Z_3	$m - \alpha$	$m + \alpha$	Z_2	Z_3
1 2	-20,3401	-23,9725	-20,3553	-23,9449	-24,7694	-19,565
1 3	4,5789	5,2179	4,5686	5,2078	4,6095	5,1439
2 4	2,1586	2,7108	2,1528	2,6981	2,1434	2,7012
3 4	-2,6145	-4,1464	-2,6069	-4,142	-2,2917	-4,4618
2 5	1,9528	1,4605	1,9535	1,4609	2,04	1,3554
2 6	-1,0916	-1,0968	-1,0961	-1,1033	-1,035	-1,1767
4 6	-15,5861	-18,4975	-16,9495	-17,1086	-15,2222	-18,84
5 7	9,4653	11,2941	9,6669	11,0813	9,1837	11,5644
6 8	-0,5756	-6,1023	-0,5544	-6,0719	-0,3611	-6,2663
25 27	-0,2966	-0,6465	-0,3004	-0,6438	-0,3523	-0,5919
8 28	-3,0545	-1,9081	-3,0022	-1,9731	-3,0833	-1,8921

6.6.1.5 Potência ativa gerada

Os resultados para a potência ativa gerada, tabela 6.21, apresentaram-se bons tanto para o FCNS quanto para o FCNT, sendo que o primeiro apresenta erros inferiores a 0,06% e o segundo inferiores a 1,81%, como visto na tabela 6.21.

6.6.1.6 Potência reativa gerada

Na potência reativa, tabela 6.23, os erros (tabela 6.23) são maiores do que os obtidos para a potência ativa mas estes permanecem inferiores a 10%, que é considerado um bom

Tabela 6.20: Erros (%) do fluxo reativo

Linha	FCNS		FCNT	
	$m - \alpha$	$m + \alpha$	Z_2	Z_3
1 2	-0,07473	0,115132	-21,7762	18,38565
1 3	0,224945	0,193564	-0,66828	1,418195
2 4	0,268693	0,468496	0,70416	0,354139
3 4	0,290687	0,106116	12,34653	-7,6066
2 5	-0,03585	-0,02739	-4,46538	7,196166
2 6	-0,41224	-0,59263	5,185049	-7,28483
4 6	-8,74754	7,508582	2,334773	-1,8516
5 7	-2,12988	1,88417	2,975077	-2,39328
6 8	3,683113	0,498173	37,26546	-2,68751
25 27	-1,28119	0,417633	-18,7795	8,445476
8 28	1,712228	-3,40653	-0,94287	0,83853

Tabela 6.21: Potência ativa (MW) para o IEEE30

Barra	FCN		FCNS		FCNT	
	Z_2	Z_3	$m - \alpha$	$m + \alpha$	Z_2	Z_3
1	249,4528	272,6213	249,5333	272,4702	244,9415	277,0519

Tabela 6.22: Erros (%) da potência ativa

Linha	FCNS		FCNT	
	$m - \alpha$	$m + \alpha$	Z_2	Z_3
1	-0,03227	0,055425	1,808478	-1,62518

6 Resultados e comentários

valor de erro, no que se refere a função sinusoidal, onde este erro refere-se a um grau de pertinência igual a 0,5 o qual pode ser útil em pouquíssimas aplicações.

Tabela 6.23: Potência reativa (MVar) para o IEEE30

Barra	FCN		FCNS		FCNT	
	Z_2	Z_3	$m - \alpha$	$m + \alpha$	Z_2	Z_3
1	-15,7611	-18,7545	-14,4248	-20,0990	-14,9556	-19,6254
2	32,4667	39,0980	31,3557	40,1562	31,1444	40,2976
5	14,7886	18,9988	15,7371	18,0337	14,0307	19,7224
8	-3,0661	3,6715	-3,0561	3,5921	-3,3198	3,8545
11	14,6329	16,4491	14,6241	16,4395	14,6067	16,4569
13	9,6918	12,5522	9,6780	12,5368	9,6612	12,5536

Tabela 6.24: Erros (%) da potência reativa

Linha	FCNS		FCNT	
	$m - \alpha$	$m + \alpha$	Z_2	Z_3
1	8,478469	-7,16895	5,110684	-4,64369
2	3,421968	-2,70653	4,072788	-3,06819
5	-6,41372	5,079795	5,124893	-3,80866
8	0,326147	2,162604	-8,27436	-4,98434
11	0,060138	0,058362	0,179049	-0,04742
13	0,142388	0,122688	0,315731	-0,01115

6.6.1.7 Perdas de potência ativa na transmissão

Nas perdas de potência, tabela 6.25, ocorreu um problema no FCNT, que é o fato deste ter apresentado perdas negativas, isto já é ressaltado em [Miranda et al., 1994], tal fato ocorre para ramos de baixo fluxo ou onde o fluxo possa ser reversível, como pode ser visto nos ramos 8-28 e 6-9. No FCNS isto não ocorreu e os erros (tabela 6.26) são baixos, somente em ramos com baixas perdas os erros aumentam, como em 8-28, para os ramos com perdas mais elevadas, que são as mais monitoradas, os erros são bons.

Tabela 6.25: Perdas ativas na transmissão (MW) para o IEEE30

Linha	FCN		FCNS		FCNT	
	Z_2	Z_3	$m - \alpha$	$m + \alpha$	Z_2	Z_3
1 2	4,9904	5,9735	4,9942	5,9655	5,402954	5,534648
1 3	2,5581	3,0561	2,5587	3,054	2,71522	2,886604
2 4	0,9988	1,1993	0,9978	1,1992	1,055084	1,137815
3 4	0,7024	0,8384	0,7029	0,8378	0,749777	0,787631
2 5	2,7805	3,2302	2,7799	3,2298	2,91204	3,088911
2 6	1,8826	2,2465	1,8818	2,2463	2,000977	2,119192
4 6	0,5764	0,6819	0,5765	0,6816	0,607838	0,647827
5 7	0,1409	0,1577	0,1402	0,1576	0,103505	0,194234
6 8	0,0954	0,1133	0,094	0,1132	0,09305	0,113476
25 27	0,0236	0,0304	0,0235	0,0304	0,005975	0,047836
8 28	0,0007	0,0002	0,0003	0,0002	-0,00877	0,00926
6 9	0	0	0	0	-0,03566	0,035661
21 22	0,0005	0,0006	0,0005	0,0006	-0,00173	0,002823

Tabela 6.26: Erros (%) das perdas ativas na transmissão

Linha	FCNS		FCNT	
	$m - \alpha$	$m + \alpha$	Z_2	Z_3
1 2	-0,07615	0,133925	-8,26695	7,346648
1 3	-0,02345	0,068715	-4,80212	11,15409
2 4	0,10012	0,008338	-5,63516	5,126741
3 4	-0,07118	0,071565	-6,74502	6,055463
2 5	0,021579	0,012383	-4,7308	4,374002
2 6	0,042494	0,008903	-6,28795	5,666949
4 6	-0,01735	0,043995	-5,4542	4,996774
5 7	0,496806	0,063412	26,5401	-23,1668
6 8	1,467505	0,088261	2,463312	-0,15534
25 27	0,423729	0	74,6822	-57,3553
8 28	57,14286	0	1353,143	-4530
6 9	-0	-0	-0	-0
21 22	0	0	445,4	-370,5

6.6.2 Resultados obtidos para o sistema IEEE57

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

6.6.2.1 Magnitude das tensões nas barras

Assim como para o IEEE30, as magnitudes das tensões, tabela 6.27, para os fluxos *fuzzy*, ficaram muito próximas dos valores obtidos com as simulações do FCN, os erros (tabela 6.28) são inferiores a 0,03% para o FCNS e 0,072% para o FCNT.

Tabela 6.27: Magnitude das tensões (p.u.) para o IEEE57

Barra	FCN		FCNS		FCNT	
	Z_2	Z_3	$m - \alpha$	$m + \alpha$	Z_2	Z_3
1	1,0400	1,0400	1,0400	1,0400	1,0400	1,0400
2	1,0100	1,0100	1,0100	1,0100	1,0100	1,0100
3	0,9850	0,9850	0,9850	0,9850	0,9850	0,9850
4	0,9826	0,9817	0,9826	0,9817	0,9826	0,9817
5	0,9781	0,9774	0,9781	0,9774	0,9782	0,9773
8	1,0050	1,0050	1,0050	1,0050	1,0050	1,0050
9	0,9800	0,9800	0,9800	0,9800	0,9800	0,9800
12	1,0150	1,0150	1,0150	1,0150	1,0150	1,0150
13	0,9845	0,9815	0,9845	0,9816	0,9847	0,9814
14	0,9764	0,9722	0,9764	0,9724	0,9767	0,9720
15	0,9929	0,9901	0,9928	0,9902	0,9931	0,9900
16	1,0164	1,0149	1,0162	1,0151	1,0170	1,0144
18	1,0042	0,9992	1,0042	0,9992	1,0043	0,9992
54	0,9986	0,9925	0,9986	0,9925	0,9987	0,9924
55	1,0303	1,0286	1,0303	1,0287	1,0307	1,0283

6.6.2.2 Ângulo nas barras

Os ângulos (tabela 6.29) continuam apresentando baixos erros, tabela 6.30, com o FCNS, inferiores a 3,82%, já o FCNT não obteve resultados tão bons quanto os obtidos para o IEEE30, os erros agora estão na faixa de 8% mas algumas barras alcançaram erros maiores, como na barra 8 onde o erro chega a 45,71%.

Tabela 6.28: Erros (%) das magnitudes das tensões

Barra	FCNS		FCNT	
	$m - \alpha$	$m + \alpha$	Z_2	Z_3
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	0	0	-0,01022	0,01023
8	0	0	0	0
9	0	0	0	0
12	0	0	0	0
13	0	-0,01019	-0,02031	0,01019
14	0	-0,02057	-0,03073	0,02057
15	0,01007	-0,01010	-0,02014	0,01010
16	0,01968	-0,01971	-0,05903	0,04927
18	0	0	-0,00996	0
54	0	0	-0,01001	0,01008
55	0	-0,00972	-0,03882	0,02917

6.6.2.3 Fluxo ativo nos ramos

Para o fluxo ativo, tabela 6.31, obteve-se bons resultados na maioria dos ramos, principalmente nas de maior interesse (mais carregadas). No entanto, nos ramos menos carregados ou onde as barras de extremidades são PV, o erro (tabela 6.32) é maior. Novamente o FCNS apresentou melhores resultados do que o FCNT. Este aumento nos erros, com relação ao IEEE30, pode ser devido ao aumento nos erros dos ângulos, já que como pode ser visto nos *Fluxos Desacoplados*, [Monticelli, 1983], o fluxo ativo está diretamente ligado aos ângulos.

6.6.2.4 Fluxo reativo nos ramos

O fluxo reativo, tabela 6.33, apresenta erros (tabela 6.34) um pouco maiores para os ramos que possuem barras PV ou barras que são terminais de transformadores em suas extremidades. Este fato foi devido a tensão nestas barras ser considerada rígida, que está diretamente ligada ao fluxo reativo (*Métodos Desacoplados*).

Devido ao valor de α nestas barras não variar, ser mantido constante em zero, percebe-se que isto influenciou no cálculo deste parâmetro para o fluxo. Para a função sinusoidal notou-se que o parâmetro α fica inferior ao valor esperado.

Tabela 6.29: Ângulos (graus) para o IEEE57

Barra	FCN		FCNS		FCNT	
	Z_2	Z_3	$m - \alpha$	$m + \alpha$	Z_2	Z_3
1	0	0	0	0	0	0
2	-1,0906	-1,2791	-1,1166	-1,2520	-0,9376	-1,4311
3	-5,5824	-6,3654	-5,6922	-6,2519	-4,9424	-7,0017
4	-6,8774	-7,8192	-6,9768	-7,7155	-6,0110	-8,6814
5	-7,9984	-9,1199	-8,0795	-9,0336	-6,7791	-10,3340
8	-3,9842	-4,9233	-4,0247	-4,8765	-2,1629	-6,7384
9	-8,9226	-10,1706	-9,0748	-10,0121	-7,5422	-11,5447
12	-9,8461	-10,9951	-10,2223	-10,6135	-9,0428	-11,7930
13	-9,2249	-10,3603	-9,4431	-10,1371	-8,3522	-11,2280
14	-8,8158	-9,8941	-8,9957	-9,7097	-8,0375	-10,6679
15	-6,8016	-7,6433	-6,9338	-7,5078	-6,1863	-8,2553
16	-8,3682	-9,3277	-8,6371	-9,0547	-7,7919	-9,8999
18	-11,2550	-12,6895	-11,3603	-12,5777	-10,3925	-13,5455
54	-11,0895	-12,5981	-11,2120	-12,4679	-9,5998	-14,0800
55	-10,2181	-11,6230	-10,3615	-11,4724	-8,8179	-13,0160

No entanto este comportamento não é ruim, porque neste caso pecca-se por cuidado, no caso de alguma aplicação, como por exemplo no caso do desligamento de um ramo faz-se isto antes do valor extremo ser atingido, ficando com uma margem de “segurança”.

6.6.2.5 Potência ativa gerada

Novamente a potência ativa mostra bons resultados (tabela 6.35), os erros (6.36) são maiores do que os obtidos para o IEEE30. No entanto continuam bons, sendo inferiores a 2,22% para o FCNS.

6.6.2.6 Potência reativa gerada

Para a potência reativa, tabela 6.37, os erros são mais constantes do que os obtidos no IEEE30 sendo inferiores a 5%, isto para o FCNS. Para o FCNT os erros aumentaram um pouco, chegando a 19%.

Tabela 6.30: Erros (%) dos ângulos

Barra	FCNS		FCNT	
	$m - \alpha$	$m + \alpha$	Z_2	Z_3
1	0	0	0	0
2	-2,3840	2,1187	14,0290	-11,8834
3	-1,9669	1,7831	11,4646	-9,9962
4	-1,4453	1,3262	12,5978	-11,0267
5	-1,0140	0,9463	15,2443	-13,3126
8	-1,0165	0,9506	45,7131	-36,8675
9	-1,7058	1,5584	15,4708	-13,5105
12	-3,8208	3,4706	8,1586	-7,2569
13	-2,3653	2,1544	9,4603	-8,3752
14	-2,0407	1,8637	8,8285	-7,8208
15	-1,9437	1,7728	9,0464	-8,0070
16	-3,2134	2,9268	6,8868	-6,1344
18	-0,9356	0,8810	7,6633	-6,7457
54	-1,1046	1,0335	13,4334	-11,7629
55	-1,4034	1,2957	13,7031	-11,9849

Tabela 6.31: Fluxo ativo (MW) para o IEEE57

Linha	FCN		FCNS		FCNT	
	Z_2	Z_3	$m - \alpha$	$m + \alpha$	Z_2	Z_3
1 2	96,1822	107,5956	97,7589	105,9562	86,9171	116,7967
2 3	92,0260	103,1203	93,5874	101,5051	82,9359	112,1527
3 4	56,6618	63,9935	56,8042	63,8254	47,0351	73,5928
4 5	12,9680	14,8006	12,7637	14,9976	9,2616	18,4988
8 9	172,4388	182,6971	176,1452	178,9852	168,0473	187,0829
9 13	2,1730	1,5822	2,8222	0,9379	7,0947	-3,3355
13 14	-9,3613	-10,5044	-9,9027	-9,9630	-6,1026	-13,7631
13 15	-45,8081	-50,7701	-47,2469	-49,3236	-41,3265	-55,2444
4 18	17,1294	18,9420	17,0533	19,0164	17,1500	18,9200
54 55	-11,0820	-12,4500	-11,6212	-11,9059	-10,7051	-12,8223
9 55	17,8070	19,9313	17,6599	20,0708	17,5441	20,1866

Tabela 6.32: Erros (%) do fluxo ativo

Linha	FCNS		FCNT	
	$m - \alpha$	$m + \alpha$	Z_2	Z_3
1 2	-1,639	1,524	9,633	-8,552
2 3	-1,697	1,566	9,878	-8,759
3 4	-0,251	0,263	16,990	-15,000
4 5	1,575	-1,331	28,581	-24,987
8 9	-2,149	2,032	2,547	-2,401
9 13	-29,876	40,722	-226,493	310,814
13 14	-5,783	5,154	34,810	-31,022
13 15	-3,141	2,849	9,783	-8,813
4 18	0,444	-0,393	-0,120	0,116
54 55	-4,866	4,370	3,401	-2,990
9 55	0,826	-0,700	1,476	-1,281

Tabela 6.33: Fluxo reativo (MVA_r) para o IEEE57

Linha	FCN		FCNS		FCNT	
	Z_2	Z_3	$m - \alpha$	$m + \alpha$	Z_2	Z_3
1 2	69,6443	66,5163	69,2098	66,9631	72,1787	63,9894
2 3	-7,3069	-10,1825	-7,7191	-9,7715	-4,9658	-12,5394
3 4	-13,8165	-13,6128	-13,7493	-13,6962	-16,2991	-11,1523
4 5	-5,1885	-6,0760	-5,1477	-6,1091	-3,5555	-7,7035
8 9	17,6528	16,5748	17,2568	16,9584	18,1072	16,1069
9 13	-7,3446	-5,3260	-6,7988	-5,8959	-8,9236	-3,7736
13 14	20,1592	23,2354	20,5605	22,7975	18,9569	24,4011
13 15	3,4401	5,0332	4,0766	4,3784	1,7516	6,7022
4 18	0,7621	1,8309	0,7553	1,8284	0,7398	1,8400
54 55	-5,4576	-6,2502	-5,4793	-6,2245	-5,8208	-5,8835
9 55	9,5464	10,9143	9,6004	10,8501	9,2789	11,1698

Tabela 6.34: Erros (%) do fluxo reativo

Linha	FCNS		FCNT	
	$m - \alpha$	$m + \alpha$	Z_2	Z_3
1 2	0,6239	-0,6717	-3,6391	3,7989
2 3	-5,6412	4,0363	32,0396	-23,1466
3 4	0,4864	-0,6127	-17,9684	18,0749
4 5	0,7864	-0,5448	31,4735	-26,7857
8 9	2,2433	-2,3144	-2,5741	2,8230
9 13	7,4313	-10,7003	-21,4988	29,1476
13 14	-1,9907	1,8846	5,9640	-5,0169
13 15	-18,5024	13,0096	49,0829	-33,1598
4 18	0,8923	0,1365	2,9261	-0,4970
54 55	-0,3976	0,4112	-6,6549	5,8670
9 55	-0,5657	0,5882	2,8021	-2,3410

Tabela 6.35: Potência ativa (MW) para o IEEE57

Barra	FCN		FCNS		FCNT	
	Z_2	Z_3	$m - \alpha$	$m + \alpha$	Z_2	Z_3
1	400,4130	446,5873	409,2873	437,5379	369,0608	477,7601

Tabela 6.36: Erros (%) para potência ativa

Linha	FCNS		FCNT	
	$m - \alpha$	$m + \alpha$	Z_2	Z_3
1	-2,2163	2,0263	7,8300	-6,9802

Tabela 6.37: Potência reativa (MVar) para o IEEE57

Barra	FCN		FCNS		FCNT	
	Z_2	Z_3	$m - \alpha$	$m + \alpha$	Z_2	Z_3
1	87,6243	87,5303	91,8449	83,1559	90,7151	84,2401
2	-99,8592	-99,1375	-101,6604	-97,3613	-100,4424	-98,5988
3	-45,0357	-35,9127	-45,9583	-35,1263	-46,8281	-34,2763
6	-13,2142	-8,1765	-13,1567	-8,2716	-14,8450	-6,5882
8	32,3554	32,9825	30,7588	34,5306	29,4738	35,8101
9	-47,6797	-37,1915	-47,1051	-37,8601	-48,2835	-36,6958
12	73,0597	84,7811	72,5167	85,1900	71,0531	86,6259

Tabela 6.38: Erros (%) para potência reativa

Linha	FCNS		FCNT	
	$m - \alpha$	$m + \alpha$	Z_2	Z_3
1	-4,8167	4,9976	-3,5273	3,7589
2	-1,8037	1,7917	-0,5840	0,5434
3	-2,0486	2,1898	-3,9800	4,5566
6	0,4351	-1,1631	-12,3413	19,4252
8	4,9346	-4,6937	8,9061	-8,5730
9	1,2051	-1,7977	-1,2664	1,3328
12	0,7432	-0,4823	2,7465	-2,1760

6.6.2.7 Perdas de potência ativa na transmissão

Repetiu-se o ocorrido na simulação do IEEE30 onde os maiores erros estão nos ramos com menores perdas. As perdas (tabela 6.39) para o FCNT não foram tão boas, com os erros, tabela 6.40, aumentando e repetindo-se as perdas negativas.

Tabela 6.39: Perdas ativas na transmissão (MW) para o IEEE57

Linha	FCN		FCNS		FCNT	
	Z_2	Z_3	$m - \alpha$	$m + \alpha$	Z_2	Z_3
1 2	1,24620	1,38530	1,26410	1,36400	1,31260	1,31260
2 3	2,47430	3,10740	2,55870	3,01050	2,77962	2,77962
3 4	0,38250	0,48410	0,37620	0,49050	0,43152	0,43162
4 5	0,11360	0,15040	0,11010	0,15430	0,13090	0,13153
4 6	0,07720	0,10740	0,07370	0,11140	0,09134	0,09170
9 13	0,00830	0,00230	0,00750	0,00360	0,00556	0,00399
13 14	0,07330	0,09600	0,07590	0,09240	0,08403	0,08422
13 15	0,59130	0,73440	0,63240	0,68950	0,66048	0,66068
19 20	0,00520	0,00680	0,00510	0,00680	-0,00092	0,01282
31 32	0,01850	0,02520	0,01800	0,02540	0,00049	0,04277
12 16	0,17870	0,22650	0,19840	0,20470	0,20133	0,20181

A partir destas simulações notou-se o FCNS comportou-se bem para as principais condições (ramos mais carregados, com maiores perdas). Os erros para as magnitudes das tensões e os ângulos nas barras são baixos, para todos os sistemas simulados, os fluxos apre-

Tabela 6.40: Erros (%) das perdas ativas na transmissão

Linha	FCNS		FCNT	
	$m - \alpha$	$m + \alpha$	Z_2	Z_3
1 2	-1,4364	1,5376	-5,3278	5,2483
2 3	-3,4111	3,1184	-12,3396	10,5484
3 4	1,6471	-1,3220	-12,8157	10,8418
4 5	3,0810	-2,5931	-15,2324	12,5439
4 6	4,5337	-3,7244	-18,3096	14,6210
9 13	9,6386	-56,5217	33,0602	-73,5652
13 14	-3,5471	3,7500	-14,6330	12,2698
13 15	-6,9508	6,1138	-11,7002	10,0380
19 20	1,9231	0	117,6346	-88,5735
31 32	2,7027	-0,7937	97,3351	-69,7302
12 16	-11,0241	9,6247	-12,6659	10,9029

sentaram bons resultados para os ramos mais carregados, que são os de maior importância (mais monitorados). As potências geradas apresentaram erros inferiores a 10%, sendo que a ativa apresentou erros inferiores aos da reativa e as perdas não apresentaram os problemas apresentados pelo FCNT, valores não admissíveis, como valores negativos para perdas ativas.

6.7 Resultados obtidos com o FCNS discreto (FCNS-dis)

Como visto no item 4.3.2, desenvolveu-se uma variação do FCNS, que foi chamada de FCNS discreto (referenciado nas tabelas por FCNSdis), a qual difere do FCNS nos cálculos dos fluxos nos ramos, potências nas barras e as perdas na transmissão, que são efetuados com as expressões do FCN convencional, como já explicado.

As tabelas trazem somente os resultados para o FCN, o FCNSdis e os erros, já que não faria sentido repetir-se os resultados para o FCNT, que seriam os mesmos apresentados nas tabelas anteriores.

6.7.1 Resultados obtidos para o sistema IEEE30

Na seqüência, encontram-se os resultados para os fluxos nos ramos, as potências nas barras e as perdas na transmissão. Procurou-se tomar os mesmos ramos que foram colocados

6 Resultados e comentários

nas tabelas para os resultados do FCNS para poder-se efetuar uma comparação entre os resultados.

6.7.1.1 Fluxo ativo nos ramos

Os erros para o fluxo ativo nos ramos, tabela 6.41, diminuíram significativamente, já que os cálculos são efetuados com as expressões do FCN convencional.

Tabela 6.41: Fluxo ativo (MW) e erro para o IEEE30 obtido com o FCNSdis

Linha	FCN		FCNSdis (MW)		Erro (%)	
	Z_2	Z_3	$m - \alpha$	$m + \alpha$	$m - \alpha$	$m + \alpha$
1 2	170,0062	185,7847	170,067	185,6587	-0,03576	0,06782
1 3	79,4465	86,8366	79,4569	86,8107	-0,01309	0,029826
2 4	43,4613	47,6086	43,4495	47,6112	0,027151	-0,00546
3 4	74,6084	81,2604	74,6244	81,2413	-0,02145	0,023505
2 5	79,9413	86,2024	79,9313	86,1965	0,012509	0,006844
2 6	59,3643	64,8492	59,3523	64,8473	0,020214	0,00293
4 6	68,9819	74,4595	68,9903	74,4509	-0,01218	0,01155
5 7	-14,2132	-14,0538	-14,2183	-14,0548	-0,03588	-0,00712
6 8	28,5673	30,5487	28,5661	30,5468	0,004201	0,00622
25 27	-4,7499	-5,3195	-4,7505	-5,3202	-0,01263	-0,01316
8 28	-0,6281	-0,4645	-0,6286	-0,465	-0,07961	-0,10764

6.7.1.2 Fluxo reativo nos ramos

Para o fluxo reativo, tabela 6.42, os erros tiveram o mesmo comportamento que para o fluxo ativo nos ramos, onde estes diminuíram consideravelmente, como no caso do ramo 6-10, onde o erro caiu abaixo de 5%. Nos demais ramos os erros abaixaram muito.

6.7.1.3 Potência ativa gerada

Os resultados para a potência ativa gerada, tabela 6.43, são bons, assim como para o FCNS onde não se encontrou muitos problemas.

6.7.1.4 Potência reativa gerada

Na potência reativa, tabela 6.44, a melhora nos erros é clara, antes os erros chegaram a 10% e agora estes não passam de 1,1%, mostrando uma boa melhora quanto aos resultados,

Tabela 6.42: Fluxo reativo (MVar) e erro para o IEEE30 obtido com o FCNSdis

Linha	FCN		FCNS		Erro (%)	
	Z_2	Z_3	$m - \alpha$	$m + \alpha$	$m - \alpha$	$m + \alpha$
1 2	-20,3401	-23,9725	-20,3724	-23,962	-0,1588	0,0438
1 3	4,5789	5,2179	4,5567	5,1967	0,484833	0,406294
2 4	2,1586	2,7108	2,149	2,6955	0,444733	0,564409
3 4	-2,6145	-4,1464	-2,6176	-4,1359	-0,11857	0,253232
2 5	1,9528	1,4605	1,944	1,4514	0,450635	0,623074
2 6	-1,0916	-1,0968	-1,0991	-1,1126	-0,68706	-1,44055
4 6	-15,5861	-18,4975	-15,5799	-18,4824	0,039779	0,081633
5 7	9,4653	11,2941	9,4609	11,2872	0,046486	0,061094
6 8	-0,5756	-6,1023	-0,5522	-6,0753	4,065323	0,442456
25 27	-0,2966	-0,6465	-0,2972	-0,647	-1,28119	0,417633
8 28	-3,0545	-1,9081	-3,0605	-1,9148	-1,28119	0,417633

Tabela 6.43: Potência ativa (MW) e erro para o IEEE30 obtido com o FCNSdis

Barra	FCN		FCNS		Erro (%)	
	Z_2	Z_3	$m - \alpha$	$m + \alpha$	$m - \alpha$	$m + \alpha$
1	249,4528	272,6213	249,5239	272,4695	-0,0285	0,055682

6 Resultados e comentários

mas mais uma vez ressalta-se que os erros encontrados para o FCNS também eram bons, sendo que FCNSdis pode ser utilizado onde deseja-se erro muito baixos.

Tabela 6.44: Potência reativa (MVar) e erro para o IEEE30 obtido com o FCNSdis

Barra	FCN		FCNS		Erro (%)	
	Z_2	Z_3	$m - \alpha$	$m + \alpha$	$m - \alpha$	$m + \alpha$
1	-15,7611	-18,7545	-15,8157	-18,7653	-0,34642	-0,05759
2	32,4667	39,0980	32,4490	38,9930	0,054517	0,268556
5	14,7886	18,9988	14,7720	18,9811	0,112249	0,093164
8	-3,0661	3,6715	-3,0992	3,6339	-1,07955	1,024105
11	14,6329	16,4491	14,6241	16,4395	0,060138	0,058362
13	9,6918	12,5522	9,678	12,5368	0,142388	0,122688

6.7.1.5 Perdas de potência ativa na transmissão

Nas perdas de potência, tabela 6.45, repetiu-se os maiores erros para os ramos que possuem perdas muito baixas, que acabam não trazendo muita preocupação para os operadores, sendo que os demais erros diminuíram.

6.7.2 Resultados obtidos para o sistema IEEE57

Esperava-se que os resultados melhorassem, assim como os do IEEE30, no entanto isto não aconteceu, os resultados melhoraram mas não na mesma proporção que os resultados do IEEE30, este fato pode ter sido causado devido aos erros para os ângulos nas barras para o IEEE30 serem baixíssimos, enquanto que para o IEEE57 os erros chegam a 3%.

6.7.2.1 Fluxo ativo nos ramos

Nota-se que os erros para o fluxo ativo nos ramos, tabela 6.46, são inferiores aos obtidos com o FCNS, mas não obtém-se uma melhora como obtido para o IEEE30. Como pode ser visto pelo ramo 9-13, onde o erro diminuiu mas ainda continua um pouco alto, devido a este ramo possuir um fluxo que pode ser considerado baixo em comparação com o fluxo, por exemplo, do ramo 8-7.

Tabela 6.45: Perdas ativas na transmissão (MW) e erro para o IEEE30 obtidos com o FCNS-dis

Linha	FCN		FCNS		Erro (%)	
	Z_2	Z_3	$m - \alpha$	$m + \alpha$	$m - \alpha$	$m + \alpha$
1 2	4,9904	5,9735	4,9831	5,9545	0,146281	0,318071
1 3	2,5581	3,0561	2,5531	3,0487	0,195458	0,242139
2 4	0,9988	1,1993	0,9959	1,197	0,290348	0,191779
3 4	0,7024	0,8384	0,7011	0,8363	0,18508	0,250477
2 5	2,7805	3,2302	2,7755	3,2254	0,179824	0,148598
2 6	1,8826	2,2465	1,8778	2,2423	0,254967	0,186957
4 6	0,5764	0,6819	0,5752	0,6805	0,208189	0,205309
5 7	0,1409	0,1577	0,1405	0,1572	0,283889	0,317058
6 8	0,0954	0,1133	0,0943	0,1122	1,15304	0,970874
25 27	0,0236	0,0304	0,0235	0,0303	0,423729	0,328947
8 28	0,0007	0,0002	0,0005	0	28,57143	100
6 9	0	0	0	0	0	0
21 22	0,0005	0,0006	0,0005	0,0006	0	0

Tabela 6.46: Fluxo ativo (MW) e erro para o IEEE57 obtido com o FCNSdis

Linha	FCN		FCNSdis (MW)		Erro (%)	
	Z_2	Z_3	$m - \alpha$	$m + \alpha$	$m - \alpha$	$m + \alpha$
1 2	96,1822	107,5956	97,7583	105,9556	-1,6387	1,5242
2 3	92,0260	103,1203	93,5855	101,5032	-1,6946	1,5682
3 4	56,6618	63,9935	56,2207	64,4072	0,7785	-0,6465
4 5	12,9680	14,8006	12,775	14,9854	1,4883	-1,2486
8 9	172,4388	182,6971	176,1451	178,9851	-2,1493	2,0318
9 13	2,1730	1,5822	2,8235	0,9358	-29,9356	40,8545
13 14	-9,3613	-10,5044	-9,1688	-10,6969	2,0563	-1,8326
13 15	-45,8081	-50,7701	-47,3211	-49,2498	-3,3029	2,9945
4 18	17,1294	18,9420	17,1563	18,9137	-0,1570	0,1494
54 55	-11,0820	-12,4500	-10,9673	-12,5601	1,0350	-0,8843
9 55	17,8070	19,9313	17,6876	20,0432	0,6705	-0,5614

6 Resultados e comentários

6.7.2.2 Fluxo reativo nos ramos

No fluxo reativo, tabela 6.47, obteve-se o mesmo comportamento que para o fluxo de potência ativo, onde os erros diminuem mas não o quanto se esperava.

Tabela 6.47: Fluxo reativo (MVar) e erro para o IEEE57 obtido com o FCNSdis

Linha	FCN		FCNS		Erro (%)	
	Z_2	Z_3	$m - \alpha$	$m + \alpha$	$m - \alpha$	$m + \alpha$
1 2	69,6443	66,5163	66,9607	69,2074	3,8533	-4,0458
2 3	-7,3069	-10,1825	-7,7264	-9,7788	-5,7411	3,9646
3 4	-13,8165	-13,6128	-13,6987	-13,7527	0,8526	-1,0277
4 5	-5,1885	-6,0760	-5,1047	-6,1543	1,6151	-1,2887
8 9	17,6528	16,5748	16,9579	17,2563	3,9365	-4,1117
9 13	-7,3446	-5,3260	-7,5115	-5,1857	-2,27242	2,6342
13 14	20,1592	23,2354	20,6182	22,7397	-2,2769	2,1334
13 15	3,4401	5,0332	3,9919	4,462	-16,0402	11,3486
4 18	0,7621	1,8309	0,7529	1,8269	1,2072	0,2185
54 55	-5,4576	-6,2502	-5,523	-6,1812	-1,1983	1,1040
9 55	9,5464	10,9143	9,5995	10,8492	-0,5562	0,5965

6.7.2.3 Potência ativa gerada

Para a potência ativa gerada, tabela 6.48, os erros são baixos, assim como eram para o FCNS.

Tabela 6.48: Potência ativa (MW) e erro para o IEEE57 obtido com o FCNSdis

Barra	FCN		FCNS		Erro (%)	
	Z_2	Z_3	$m - \alpha$	$m + \alpha$	$m - \alpha$	$m + \alpha$
1	400,4130	446,5873	409,275	437,5458	-2,2132	2,0246

6.7.2.4 Potência reativa gerada

Para a potência reativa, tabela 6.49, o comportamento foi aleatório, já que nas barras que possuíam erro inferiores a 1%, estes aumentaram e nas barras onde os erros chegavam até 5%, estes diminuíram.

Tabela 6.49: Potência reativa (MVar) e erro para o IEEE57 obtido com o FCNSdis

Barra	FCN		FCNS		Erro (%)	
	Z_2	Z_3	$m - \alpha$	$m + \alpha$	$m - \alpha$	$m + \alpha$
1	87,6243	87,5303	86,9594	87,9958	0,7588	-0,5318
2	-99,8592	-99,1375	-99,7861	-99,255	0,0732	-0,1185
3	-45,0357	-35,9127	-44,3644	-36,74	1,4906	-2,3036
6	-13,2142	-8,1765	-13,2977	-8,1355	-0,6319	0,5014
8	32,3554	32,9825	31,8283	33,4557	1,6291	-1,4347
9	-47,6797	-37,1915	-47,362	-37,6174	0,6663	-1,1452
12	73,0597	84,7811	76,8182	80,8608	-5,1444	4,6240

6.7.2.5 Perdas de potência ativa na transmissão

Assim como para as outras variáveis, as perdas de potência, tabela 6.50, apresentaram pouca melhora nos resultados. Os maiores erros continuam sendo nos ramos onde tem-se baixas perdas.

Tabela 6.50: Perdas ativas na transmissão (MW) e erro para o IEEE57 obtidos com o FCNSdis

Linha	FCN		FCNS		Erro (%)	
	Z_2	Z_3	$m - \alpha$	$m + \alpha$	$m - \alpha$	$m + \alpha$
1 2	1,24620	1,38530	1,2627	1,3625	-1,32403	1,64585
2 3	2,47430	3,10740	2,5538	3,0055	-3,21303	3,27927
3 4	0,38250	0,48410	0,3745	0,4886	2,09150	-0,92956
4 5	0,11360	0,15040	0,1091	0,1534	3,96127	-1,99468
4 6	0,07720	0,10740	0,0727	0,1103	5,82902	-2,70019
9 13	0,00830	0,00230	0,0094	0,0001	13,25300	95,65217
13 14	0,07330	0,09600	0,0794	0,0889	-8,32196	7,39583
13 15	0,59130	0,73440	0,6319	0,6892	-6,86623	6,15468
19 20	0,00520	0,00680	0,0054	0,0065	-3,84615	0,00000
31 32	0,01850	0,02520	0,018	0,0253	2,70270	-0,39683
12 16	0,17870	0,22650	0,1979	0,2052	10,74430	9,40397

A partir das simulações efetuadas com o FCNSdis, pode-se concluir que ele melhora os resultados do FCNS. No entanto, existem situações em que esta melhora é significativa, como no caso o IEEE30 e em outros ela não é tão significativa. Sempre deve-se analisar qual fluxo

FCNS ou FCNSdis deve ser utilizado na aplicação que se está implementando, para sempre fazer uso do fluxo que melhor se adequa a esta aplicação.

Com as simulações com o FCNSdis, foi possível notar que a melhora dos resultados com relação ao FCNS depende diretamente dos erros para as magnitudes das tensões e para os ângulos nas barras, quando estes são muito baixos, como para o IEEE30, inferiores a 0,4%, as melhoras são significativas, mas quando os erros começam a aumentar, chegando a 4% o FCNSdis não consegue melhorar em muito os resultados.

6.8 Resultados para parte do sistema constante

Como último teste para o fluxos *fuzzy*, somente em parte das barras do sistema as potências foram consideradas como números nebulosos. Nas barras restantes, as potências foram consideradas como valores constantes.

Este tipo de simulação pode ser útil para situações onde parte do sistema não possua medições, então não se tem precisão quanto aos valores das potências nas barras que estejam dentro desta região. Nestes casos pode-se colocar as potências destas barras como sendo nebulosas e onde possua-se medições colocam-se as potências como valores constantes.

6.8.1 Resultados obtidos para o sistema IEEE30 parcial

Para o IEEE30, foram colocadas como nebulosas as barras de número 15 à 30, já que as barras que são PV e têm maior condições de medição estão entre as barras de número 1 à 14. Simulando-se os fluxos Newton *fuzzy* pode-se obter os resultados que são mostrados a seguir.

6.8.1.1 Magnitude das tensões nas barras

As magnitudes apresentadas na tabela 6.51 fornecidas pelos fluxos *fuzzy*, estão muito próximas das obtidas com o FCN, as obtidas com o FCNS possuem erros menores, tabela 6.52, dos que os apresentados pelo FCNT.

Conclui-se assim que o fato de colocar parte do sistema sendo constante e parte nebuloso, não afetou no desempenho das rotinas com relação as magnitudes das tensões.

6.8.1.2 Ângulos nas barras

Também para os ângulos das barras, tabela 6.53, os resultados foram ótimos para o FCNS, para o qual obteve-se erros menores do que quando simulou-se o sistema como sendo

Tabela 6.51: Magnitude das tensões (p.u.) para o IEEE30

Barra	FCN		FCNS		FCNT	
	Z_2	Z_3	$m - \alpha$	$m + \alpha$	Z_2	Z_3
1	1,0600	1,0600	1,0600	1,0600	1,0600	1,0600
2	1,0430	1,0430	1,0430	1,0430	1,0430	1,0430
3	1,0226	1,0213	1,0226	1,0213	1,0233	1,0206
4	1,0142	1,0126	1,0142	1,0126	1,0148	1,0120
5	1,0100	1,0100	1,0100	1,0100	1,0100	1,0100
6	1,0129	1,0116	1,0129	1,0116	1,0133	1,0112
8	1,0100	1,0100	1,0100	1,0100	1,0100	1,0100
12	1,0577	1,0553	1,0577	1,0553	1,0584	1,0546
14	1,0435	1,0401	1,0435	1,0402	1,0446	1,0391
15	1,0399	1,0353	1,0399	1,0353	1,0407	1,0346
16	1,0471	1,0430	1,0471	1,0430	1,0478	1,0423
28	1,0118	1,0101	1,0118	1,0101	1,0122	1,0097

Tabela 6.52: Erros (%) para as magnitudes das tensões

Barra	FCNS		FCNT	
	$m - \alpha$	$m + \alpha$	Z_2	Z_3
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	-0,06845	0,06854
4	0	0	-0,05916	0,059253
5	0	0	0	0
6	0	0	-0,03949	0,039541
8	0	0	0	0
12	0	0	-0,06618	0,066332
14	0	-0,00961	-0,10541	0,096145
15	0	0	-0,07693	0,067613
16	0	0	-0,06685	0,067114
28	0	0	-0,03953	0,0396

6 Resultados e comentários

totalmente nebuloso, o que pode ser visto na tabela 6.54, já para o FCNT, os erros aumentam um pouco mas ainda estão abaixo de 5%.

Tabela 6.53: Ângulos (graus) para o IEEE30

Barra	FCN		FCNS		FCNT	
	Z_2	Z_3	$m - \alpha$	$m + \alpha$	Z_2	Z_3
1	0	0	0	0	0	0
2	-5,3997	-5,6000	-5,3995	-5,5997	-5,1352	-5,8640
3	-7,8394	-8,1569	-7,8391	-8,1566	-7,5237	-8,4720
4	-9,4597	-9,8482	-9,4594	-9,8477	-9,0777	-10,2294
5	-14,2250	-14,5602	-14,2246	-14,5597	-13,5437	-15,2406
6	-11,1988	-11,6469	-11,1984	-11,6463	-10,7444	-12,1004
8	-11,8981	-12,3777	-11,8976	-12,3770	-11,4083	-12,8663
12	-15,4652	-16,2979	-15,4641	-16,2966	-14,9652	-16,7954
14	-16,3020	-17,1897	-16,3007	-17,1882	-15,7756	-17,7133
15	-16,3542	-17,2723	-16,3529	-17,2707	-15,8415	-17,7821
16	-15,9427	-16,8275	-15,9415	-16,8260	-15,4393	-17,3282
28	-11,8400	-12,3346	-11,8396	-12,3340	-11,3719	-12,8017

6.8.1.3 Fluxo ativo nos ramos

Com relação ao fluxo ativo nos ramos, tabela 6.55, obteve-se resultados bons, os erros, tabela 6.56, são compatíveis com os obtidos para o caso em que o sistema é totalmente nebuloso, sendo que estes aumentam para os ramos que são fronteira, ou seja, ramos que possuem um extremo como sendo uma barra que tem as potências consideradas nebulosas e a outra barra com as potências constantes, como no ramo 14-15 e o ramo 6-28, sendo que nesta última o erro é maior devido ao ramo estar pouco carregado, problema que ocorreu anteriormente.

No restante dos ramos os erros são bons para o FCNS, chegando a serem melhores do que para o caso anterior (sistema totalmente nebuloso).

6.8.1.4 Fluxo reativo nos ramos

Sendo uma surpresa, o fluxo reativo (tabela 6.57) mostrou um comportamento melhor do que o ativo, já que a parte reativa do fluxo Newton sempre traz mais problemas. Os erros, tabela 6.58, são bons, sendo que o FCNT trabalhou pior do que para a situação em que o

Tabela 6.54: Erros (%) para os ângulos

Barra	FCNS		FCNT	
	$m - \alpha$	$m + \alpha$	Z_2	Z_3
1	0	0	0	0
2	0,0037	0,0054	4,8984	-4,7143
3	0,0038	0,0037	4,0271	-3,8630
4	0,0032	0,0051	4,0382	-3,8708
5	0,0028	0,0034	4,7895	-4,6730
6	0,0036	0,0052	4,0576	-3,8937
8	0,0042	0,0057	4,1166	-3,9474
12	0,0071	0,0080	3,2331	-3,0525
14	0,0080	0,0087	3,2291	-3,0460
15	0,0079	0,0093	3,1350	-2,9515
16	0,0075	0,0089	3,1576	-2,9755
28	0,0034	0,0049	3,9535	-3,7869

Tabela 6.55: Fluxo ativo (MW) para o IEEE30

Linha	FCN		FCNS		FCNT	
	Z_2	Z_3	$m - \alpha$	$m + \alpha$	Z_2	Z_3
1 2	174,7644	180,9775	174,7579	180,9692	166,5604	189,1654
1 3	81,5319	84,7407	81,6059	84,6621	78,3811	87,8865
2 4	44,5046	46,5598	44,7172	46,3438	43,2609	47,7998
3 4	76,4382	79,4299	76,4907	79,3753	73,6753	82,1904
2 5	82,4591	83,6719	82,4578	83,6702	78,7110	87,4169
2 6	60,8232	63,3812	60,9775	63,2226	58,9285	65,2711
4 6	70,7004	72,7409	70,5918	72,8495	68,0160	75,4252
12 16	5,9777	6,7178	6,3186	6,3762	5,9683	6,7265
14 15	1,1542	1,6047	1,2803	1,4779	1,3000	1,4583
8 28	-0,7342	-0,3588	-0,6135	-0,4801	-0,6108	-0,4828
6 28	18,2368	19,6653	18,4016	19,5000	17,9101	19,9914

Tabela 6.56: Erros (%) para o fluxo ativo

Linha	FCNS		FCNT	
	$m - \alpha$	$m + \alpha$	Z_2	Z_3
1 2	0,00372	0,00459	4,69432	-4,52426
1 3	-0,09076	0,09275	3,86450	-3,71227
2 4	-0,47770	0,46392	2,79454	-2,66324
3 4	-0,06868	0,06874	3,61455	-3,47539
2 5	0,00158	0,00203	4,54540	-4,47582
2 6	-0,25369	0,25023	3,11509	-2,98180
4 6	0,15361	-0,14930	3,79687	-3,69022
12 16	-5,70286	5,08500	0,15725	-0,12951
14 15	-10,92532	7,90179	-12,63213	9,12320
8 28	16,43966	-33,80713	16,80741	-34,55964
6 28	-0,90367	0,84057	1,79143	-1,65825

sistema era totalmente nebuloso. Para o FCNS os erros diminuíram significativamente com relação ao sistema sendo considerado totalmente nebuloso.

6.8.1.5 Potência ativa gerada

Para a potência ativa gerada, tabela 6.59, os erros (tabela 6.59) continuam bons tanto para o FCNS quanto para o FCNT, sendo que para o FCNS eles diminuíram com relação a situação anterior.

6.8.1.6 Potência reativa gerada

Na potência reativa, tabela 6.61, novamente os erros (tabela 6.61) para o FCNS melhoraram com relação a situação do sistema totalmente nebuloso e o FCNT apresenta erros maiores.

6.8.1.7 Perdas de potência ativa na transmissão

Para as perdas de potência, tabela 6.63, repetiu-se o problema com o FCNT, que é o fato do programa apresentar perdas negativas. No restante, os erros (tabela 6.64) permaneceram baixos para o FCNS, com o problema ocorrendo novamente nos ramos com baixas perdas, onde os erros aumentam, como em 8-28.

Equivalentes resultados são obtidos também para o IEEE57, ou seja com erros baixos, comprovando que o FCNS trabalha bem com este tipo de situação onde o sistema é parte constante e parte nebuloso.

Tabela 6.57: Fluxo reativo (MVar) para o IEEE30

Linha	FCN		FCNS		FCNT	
	Z_2	Z_3	$m - \alpha$	$m + \alpha$	Z_2	Z_3
1 2	-21,4510	-22,8814	-21,4495	-22,8795	-19,5650	-24,7694
1 3	4,6648	5,0996	4,6619	5,0959	4,6095	5,1439
2 4	2,2288	2,6241	2,2258	2,6203	2,1434	2,7012
3 4	-3,1461	-3,6067	-3,1419	-3,6108	-2,2917	-4,4618
2 5	1,7456	1,6503	1,7457	1,6504	2,0400	1,3554
2 6	-1,1954	-1,0086	-1,1977	-1,0114	-1,1767	-1,0350
4 6	-16,4730	-17,5948	-17,0549	-17,0067	-15,2222	-18,8400
12 16	2,8025	3,3615	2,7961	3,3655	2,8371	3,3245
14 15	0,5955	0,7476	0,5945	0,7478	0,6090	0,7333
8 28	-2,8638	-2,1043	-2,8674	-2,1080	-1,8921	-3,0833
6 28	-9,8917	-9,5131	-9,8811	-9,5304	-9,7549	-9,6568

Tabela 6.58: Erros (%) para o fluxo reativo

Linha	FCNS		FCNT	
	$m - \alpha$	$m + \alpha$	Z_2	Z_3
1 2	0,00699	0,00830	8,79213	-8,25124
1 3	0,06217	0,07255	1,18547	-0,86870
2 4	0,13460	0,14481	3,83166	-2,93815
3 4	0,13350	-0,11368	27,15743	-23,70865
2 5	-0,00573	-0,00606	-16,86526	17,86948
2 6	-0,19240	-0,27761	1,56433	-2,61749
4 6	-3,53245	3,34246	7,59303	-7,07709
12 16	0,22837	-0,11899	-1,23461	1,10070
14 15	0,16793	-0,02675	-2,26700	1,91279
8 28	-0,12571	-0,17583	33,93044	-46,52378
6 28	0,10716	-0,18185	1,38298	-1,51055

Tabela 6.59: Potência ativa (MW) para o IEEE30

Barra	FCN		FCNS		FCNT	
	Z_2	Z_3	$m - \alpha$	$m + \alpha$	Z_2	Z_3
1	256,2963	265,7181	256,2889	265,7062	244,9415	277,0519

Tabela 6.60: Erros (%) para a potência ativa

Linha	FCNS		FCNT	
	$m - \alpha$	$m + \alpha$	Z_2	Z_3
1	0,00289	0,00448	4,43034	-4,26535

Tabela 6.61: Potência reativa (MVar) para o IEEE30

Barra	FCN		FCNS		FCNT	
	Z_2	Z_3	$m - \alpha$	$m + \alpha$	Z_2	Z_3
1	-16,7862	-17,7818	-16,0399	-18,5313	-14,9556	-19,6254
2	34,1968	37,2731	33,6889	37,7630	31,1444	40,2976
5	16,5441	17,2158	16,3722	17,3818	14,0307	19,7224
8	-1,7159	2,2836	-1,7542	2,2891	-3,3198	3,8545
11	14,8215	16,2534	14,8160	16,2475	14,6067	16,4569
13	10,2055	12,0250	10,1980	12,0168	9,6612	12,5536

Tabela 6.62: Erros (%) para a potência reativa

Linha	FCNS		FCNT	
	$m - \alpha$	$m + \alpha$	Z_2	Z_3
1	4,44591	-4,21498	10,90539	-10,36790
2	1,48523	-1,31435	8,92598	-8,11443
5	1,03904	-0,96423	15,19212	-14,55988
8	-2,23206	-0,24085	-93,47281	-68,79051
11	0,03711	0,03630	1,44925	-1,25205
13	0,07349	0,06819	5,33340	-4,39584

Tabela 6.63: Perdas ativas na transmissão (MW) para o IEEE30

Linha	FCN		FCNS		FCNT	
	Z_2	Z_3	$m - \alpha$	$m + \alpha$	Z_2	Z_3
1 2	5,2775	5,6646	5,2771	5,6640	5,4030	5,5346
1 3	2,6936	2,9107	2,6934	2,9105	2,7152	2,8866
2 4	1,0472	1,1471	1,0469	1,1469	1,0551	1,1378
3 4	0,7384	0,7997	0,7384	0,7996	0,7498	0,7876
2 5	2,9572	3,0443	2,9571	3,0442	2,9120	3,0889
2 6	1,9762	2,1461	1,9760	2,1458	2,0010	2,1192
12 16	0,0368	0,0479	0,0365	0,0479	0,0251	0,0592
14 15	0,0034	0,0064	0,0032	0,0064	-0,0069	0,0165
16 17	0,0059	0,0082	0,0058	0,0082	-0,0091	0,0231
24 25	0,0107	0,0104	0,0104	0,0106	-0,0235	0,0446
25 26	0,0398	0,0495	0,0396	0,0494	0,0343	0,0546
25 27	0,0244	0,0296	0,0242	0,0296	0,0060	0,0478
8 28	0,0006	0,0001	0,0003	0,0002	-0,0088	0,0093

Tabela 6.64: Erros (%) para as perdas ativas na transmissão

Linha	FCNS		FCNT	
	$m - \alpha$	$m + \alpha$	Z_2	Z_3
1 2	0,00758	0,01059	-2,37715	2,29411
1 3	0,00743	0,00687	-0,80264	0,82784
2 4	0,02865	0,01744	-0,75286	0,80943
3 4	0,00000	0,01250	-1,54076	1,50919
2 5	0,00338	0,00328	1,52712	-1,46539
2 6	0,01012	0,01398	-1,25377	1,25381
12 16	0,81522	0,00000	31,71467	-23,51775
14 15	5,88235	0,00000	302,76	-157,41
16 17	1,69492	0,00000	253,56	-181,45
24 25	2,80374	-1,92308	319,44	-328,50
25 26	0,50251	0,20202	13,7965	-10,3657
25 27	0,81967	0,00000	75,51230	-61,60811
8 28	50	-100	1562	-9160

Capítulo 7

Conclusões e aplicações

Este trabalho teve como principal objetivo desenvolver métodos para simular fluxos de carga utilizando matemática nebulosa ou seja, a partir de um banco de dados na forma de distribuições de possibilidades obter uma saída com o mesmo formato e com baixos erros.

Buscou-se desenvolver metodologias que fossem mais simples e de fácil entendimento do que as encontradas em [Miranda et al., 1994], que é uma das poucas publicações nesta área.

A função de pertinência do tipo sinusoidal apresentou vantagens sobre a trapezoidal por possuir seus próprios operadores nebulosos que facilitaram os cálculos e por ser definida com apenas dois valores numéricos, enquanto que a trapezoidal necessita de no mínimo quatro pontos. A função trapezoidal necessita também de outros recursos para a sua implementação, como cortes de nível e aritmética intervalar [Miranda et al., 1994].

Inicialmente buscou-se desenvolver os fluxos de carga de forma que todos os cálculos fossem executados com os operadores nebulosos, no entanto para a metodologia do fluxo de carga Newton isto não foi possível devido à propagação dos valores de α durante o processo iterativo [Pedrycz e Gomide, 1998]. Optou-se pelo mesmo recurso utilizado em [Miranda et al., 1994] de simular um FCN com os valores correspondentes ao parâmetros m dos dados iniciais e assim obter as distribuições de possibilidades.

Com o FCLS, que foi implementado totalmente com operadores nebulosos, obteve-se bons resultados, com baixos erros. Este apresentou como vantagem sobre o FCLT o fato de não necessitar do artifício de tomar o ponto médio das distribuições dos dados de entrada para simular um FCL e só depois obter as distribuições dos resultados. Outra vantagem é que os erros calculados para os resultados corresponderam a um grau de pertinência igual a 0,5, enquanto que para o FCLT este valor é igual a 1, sendo esta também uma vantagem do FCNS.

O FCNS apresentou ótimos resultados (erros inferiores a 0.10%) para as magnitudes das

tensões e para os ângulos e também para os fluxos e perdas nos ramos mais carregados, que acabam sendo os mais monitorados, sendo assim uma boa ferramenta para ser utilizada em aplicações que envolvem fluxo de carga.

O FCNS apresentou menor esforço computacional do que o FCNT, como pode ser constatado na tabela 7.1 (*MatLab*[®]), onde se observa que o número de *flops* necessários para simular o FCNS é menor do que para o FCNT. O número de *flops* para o FCN corresponde à simulação de três FCN, considerando as seguintes condições de carregamento: $m - \alpha$, m e $m + \alpha$.

Tabela 7.1: Número de *flops* necessários para simular o IEEE30

FCN	FCNS	FCNT
3.009.189	1.463.066	2.132.716

No entanto não haveria sentido algum desenvolver estes métodos se não houvesse alguma aplicação ou vantagem para eles. Então, a seguir apresentam-se propostas de aplicações para estes fluxos *fuzzy*.

7.1 Proposta para o FCLS

7.1.1 Planejamento da expansão

Assim como o FCL, o FCLS pode ser utilizado para o planejamento da expansão.

Esta aplicação está sendo proposta devido ao FCLS ser simulado com um esforço computacional inferior ao FCNS, tornando as fases de planejamento mais dinâmicas, já que durante estas simulam-se várias vezes um fluxo de carga.

Com o FCLS a quantidade de simulações necessária para efetuar o planejamento pode ser reduzido, já que, após a obtenção das distribuições de possibilidade para os dados de entrada (potências ativa e reativa), simula-se o sistema com o FCLS e tem-se como saída, também, uma distribuição de possibilidade que representa não só um estado do sistema mas uma distribuição que cobre uma variação de potência estabelecida nos dados de entrada.

Ao invés de simular-se vários fluxos com diferentes condições de carregamento, pode-se estabelecer que as distribuições de entrada para as potências sejam formadas de maneira a cobrir a variação que se espera para estas, ou seja, pode-se colocar o parâmetro α como sendo o percentual de variação destas potências, por exemplo, o aumento de carga em uma barra para os próximos cinco anos, e o estado atual assume o valor do parâmetro m .

Ainda tem-se a vantagem das distribuições possuírem variação no valor da pertinência, ou seja, se é feito o planejamento para vários anos, não se tem certeza absoluta de quanto será o aumento das potências, quanto maior o período de planejamento, menor a certeza do aumento ou diminuição das potências. Com a variação do grau de pertinência este fato já está incluso na distribuição de possibilidade, quanto mais se aumentam as potências, para previsões mais distantes no futuro, o grau de pertinência diminui, figura 7.1.

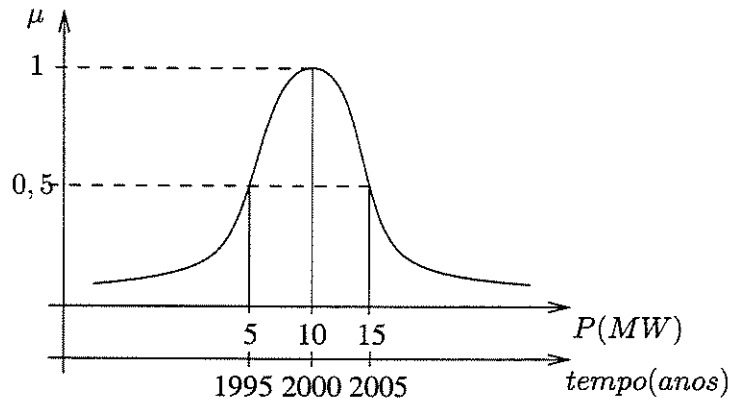


Figura 7.1: Previsão para o aumento da potência na barra k, com o passar dos anos

Com isto, a partir de um número menor de simulações espera-se chegar as mesmas conclusões que se obtém com várias simulações do FCL.

7.2 Propostas para o FCNS

7.2.1 Permite traduzir resultados numéricos em lingüísticos

Os pesquisadores sempre procuram trazer os modelos matemáticos o mais próximo possível da realidade, mas existem situações em que isto não é possível ou torna o modelo muito complexo ou em casos extremos, impraticável. Isto acontece na operação dos sistemas de energia elétrica, onde um operador com certa experiência adquirida afirma que: *o fluxo de potência ativa naquele ramo está alto*, sendo que tal afirmação poderia ser interpretada de diferentes maneiras por diferentes operadores.

A partir das distribuições de possibilidade dos dados de saída na forma sinusoidal, é possível estabelecer uma forma melhor de interpretar estas afirmações como por exemplo, *a tensão na barra k está boa* (figura 7.2). Pela figura tem-se faixas de variação para o grau de pertinência, para as quais estabelecem-se padrões de análise.

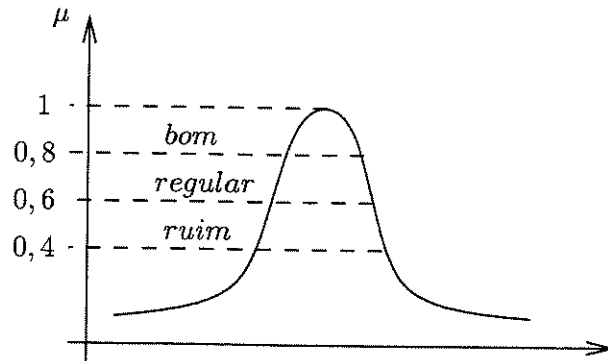


Figura 7.2: Exemplo de interpretação dos resultados

Assim, este tipo de afirmação que antes poderia ser interpretada de várias formas, agora pode ser interpretada de uma forma mais coerente e confiável, trazendo benefícios para a área de operação do sistema e outras áreas onde se possa aplicar tal evolução.

7.2.2 Possibilidade de utilização para o planejamento da expansão

Diante da possibilidade da redução da quantidade de simulações a serem executadas durante o estudo do planejamento, podem ser executados estudos que analisem o quanto de esforço computacional extra será utilizado se ao invés de utilizar-se o FCLS utilizar o FCNS.

Utilizando-se o FCNS tem-se a vantagem de ter os valores tanto para as variáveis que se referem à parte ativa do fluxo quanto para as variáveis que se referem a parte reativa. Com ele tem-se não somente os valores dos ângulos mas também os das magnitudes das tensões.

Como desvantagem com relação ao FCLS, o FCNS não irá convergir para as situações em que o sistema não possua solução factível.

7.2.3 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, isto é devido as variações da 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 FCNS, efetuar-se 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 variações “amplas”. Busca-se, assim, diminuir a possibilidade de erros durante a tomada de decisões.

7.2.4 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. Isto tudo a partir das distribuições de possibilidades destas variáveis.

Podem ser gerados bancos de dados com os padrões do sistema, onde irão constar as distribuições de possibilidades das variáveis, como na figura 7.2 e as faixas para as quais deve-se emitir alerta ou desligar uma barra ou um ramo.

Por exemplo, para a tensão na barra k , pode-se através de estudos estabelecer que se a tensão no momento da medição:

- possui um grau de pertinência entre $[0,9 \ 1,0]$ está tudo bem, não se toma nenhuma medida;
- possui um grau de pertinência entre $[0,8 \ 0,9]$, tensão abaixando, ligar banco de capacitores;
- possui um grau de pertinência entre $[0,78 \ 0,8]$, tensão baixa, emitir alarme;
- possui um grau de pertinência entre $[0,74 \ 0,78]$, tensão muito baixa, efetuar medida corretiva de urgência.

Este procedimento pode ser efetuado para todas as variáveis do sistema, automatizando o sistema de controle.

Para as magnitudes das tensões, devido aos baixos erros, acredita-se que este procedimento possa ser executado com muito sucesso. Também para os fluxos ativos, principalmente nos ramos mais carregados.

Referências Bibliográficas

- Das, D., Ghosh, S. e Srinivas, D. K. [1999]. Fuzzy distribution load flow, *Electric Machines and Power Systems* **27**: 1215–1226.
- Kenarangui, R. e Seifi, A. [1994]. Fuzzy power flow analysis, *Electric Power Systems Research* **29**: 105–109.
- Miranda, V. [1997]. Interval and fuzzy power flows. Text prepared as a support to Power Systems courses in the University of Macau.
- Miranda, V. e Matos, M. A. [1989]. Distribution system planning with fuzzy models and techniques, *CIRE* pp. 472–476.
- Miranda, V., Matos, M. A. e Saraiva, J. T. [1994]. Fuzzy load flow - new algorithms incorporating uncertain generation and load representation, *Przegl. Elektrotech* pp. 621–627.
- Miranda, V. e Saraiva, J. T. [1992]. Fuzzy modelling of power system optimal load flow, *Transaction on Power Systems* (2) **7**: 843–849.
- Monticelli, A. [1983]. *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*, Editora Edigard Blücher LTDA, São Paulo - Brasil.
- Monticelli, A., Garcia, A. e Saavedra, O. R. [1990]. Fast decoupled load flow: Hypothesis, derivations, and testing, *IEEE Trans. on Power Systems*, (4) **6**: 1425–1431.
- Pedrycz, W. e Gomide, F. [1998]. *An Introduction to Fuzzy Sets: Analysis and Design*, A Bradford Book - The MIT Press.
- Pereira, M. A. e Murari, C. A. F. [1999]. Electrical distribution systems fuzzy load estimation, *Intelligent System Application to Power Systems (ISAP'99)* pp. 370–375.
- Sandri, S. [1997]. *Introdução à Lógica “Fuzzy”*, 3º SBAI - Minicurso M2, chapter 3º SBAI - Minicurso M2, p. 54.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Zadeh, L. [1965]. Fuzzy sets, Information and Control 8: 338–353.

Zadeh, L. [1978]. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility, Fuzzy Sets and Systems 1: 3–28.

Apêndice A

Modelo de transformador utilizado

Devido a existirem vários modelos para os transformadores com tap variável, coloca-se a seguir a representação do transformador utilizado (figura A.1) e as expressões para os fluxos no mesmo.

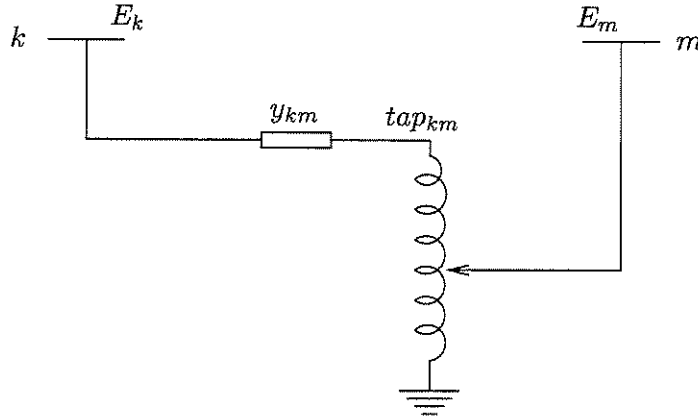


Figura A.1: Modelo de transformador utilizado no programa

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

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

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

Apêndice B

Dados do sistema de treze barras de Oporto

Devido este sistema não ser conhecido, seus dados não são de um fácil acesso, então a seguir estão reproduzidos as tabelas apresentadas no artigo [Miranda et al., 1994], onde ele apresenta quatro valores para definir a função trapezoidal.

Para efetuar as simulações foi calculado o ponto médio destas distribuições e então a partir deste ponto médio, aplicou-se a porcentagens estabelecidas no *Capítulo 6*, montando-se assim as distribuições, tanto a sinusoidal quanto a trapezoidal utilizadas na simulação.

Tabela B.1: Distribuições de possibilidade para potência ativa do sistema de Oporto

Barra	Tipo	V(p.u.)	Potência Ativa Gerada				Potência Ativa de Carga			
			P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4
1	Slack	1.05	-	-	-	-	0.0	0.0	0.0	0.0
2	PQ	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	PQ	-	0.07	0.076	0.084	0.09	0.494	0.498	0.504	0.508
4	PV	1.0505	0.392	0.396	0.404	0.408	0.132	0.134	0.138	0.140
5	PQ	-	0.054	0.056	0.060	0.062	0.082	0.084	0.088	0.090
6	PQ	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	PQ	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.088	0.090	0.094	0.096
8	PQ	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.098	0.100	0.104	0.106
9	PQ	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.068	0.070	0.074	0.078
10	PQ	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.049	0.051	0.055	0.057
11	PQ	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.108	0.110	0.114	0.116
12	PQ	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.070	0.072	0.076	0.078
13	PQ	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.053	0.054	0.056	0.057

B Dados do sistema de treze barras de Oporto

Tabela B.2: Distribuições de possibilidade para potência reativa do sistema de Oporto

Barra	Potência Reativa Gerada				Potência Reativa de Carga			
	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4
1	-	-	-	-	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.210	0.228	0.252	0.270	0.247	0.249	0.252	0.254
4	-	-	-	-	0.0792	0.0804	0.0828	0.0840
5	0.1260	0.1307	0.1493	0.1540	0.0475	0.0487	0.0510	0.0522
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0352	0.0360	0.0376	0.0384
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0343	0.0350	0.0364	0.371
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0306	0.0315	0.0333	0.0342
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0245	0.0255	0.0275	0.0285
11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0378	0.0385	0.0399	0.0406
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0280	0.0288	0.0304	0.0312
13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0238	0.0243	0.0252	0.0257

Tabela B.3: Dados dos ramos para o sistema de Oporto

Linha	nó inicial	nó final	r (p.u.)	x (p.u.)	y/2 (p.u.)
1	2	4	0.007191	0.057528	0.0
2	3	6	0.034975	0.279802	0.0
3	5	7	0.031276	0.250212	0.0
4	6	10	0.008748	0.029322	0.0
5	6	8	0.008172	0.024306	0.002172
6	8	9	0.020377	0.040027	0.000771
7	9	10	0.019181	0.037675	0.000726
8	10	13	0.015550	0.047124	0.002352
9	7	13	0.011274	0.034165	0.001706
10	7	11	0.014098	0.011944	0.004388
11	7	12	0.007764	0.014508	0.002064
12	1	3	0.0	0.125000	0.0
13	1	2	0.0	0.142857	0.0
14	4	5	0.0	0.200000	0.0

Apêndice C

Resultados completos para o IEEE30 utilizando os fluxos linearizados

As tabelas estão distribuídas da seguinte maneira: tabelas C.1 à C.4 - FCL, tabelas C.5 à C.6 - FCLT e tabelas C.7 à C.10 - FCLS.

C Resultados completos para o IEEE30 utilizando os fluxos linearizados

Tabela C.1: Ângulos para o FCL convencional

Barra	Ângulos (graus)			
	P_1	P_2	P_3	P_4
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	-5,3771	-5,4971	-5,9886	-6,1098
3	-8,0476	-8,2258	-8,9798	-9,1595
4	-9,6149	-9,8273	-10,7244	-10,9383
5	-13,9582	-14,2628	-15,4101	-15,7163
6	-11,2230	-11,4700	-12,5004	-12,7491
7	-12,9450	-13,2287	-14,3709	-14,6562
8	-11,9003	-12,1617	-13,2390	-13,5021
9	-14,3418	-14,6563	-16,0308	-16,3471
10	-15,9912	-16,3414	-17,8978	-18,2498
11	-14,3418	-14,6563	-16,0308	-16,3471
12	-15,3226	-15,6585	-17,1567	-17,4943
13	-15,3226	-15,6585	-17,1567	-17,4943
14	-16,3477	-16,7057	-18,3127	-18,6726
15	-16,4851	-16,8461	-18,4664	-18,8292
16	-15,9882	-16,3384	-17,9026	-18,2545
17	-16,2720	-16,6283	-18,2174	-18,5755
18	-17,1337	-17,5086	-19,1953	-19,5720
19	-17,2959	-17,6743	-19,3763	-19,7566
20	-17,0368	-17,4097	-19,0826	-19,4573
21	-16,6050	-16,9685	-18,5914	-18,9566
22	-16,5779	-16,9408	-18,5609	-18,9256
23	-16,9333	-17,3039	-18,9686	-19,3411
24	-17,0709	-17,4446	-19,1189	-19,4944
25	-16,6168	-16,9808	-18,6019	-18,9679
26	-17,3275	-17,7068	-19,4046	-19,7859
27	-15,9352	-16,2846	-17,8290	-18,1804
28	-11,8547	-12,1155	-13,2093	-13,4717
29	-17,2899	-17,6687	-19,3604	-19,7412
30	-18,1790	-18,5770	-20,3648	-20,7648

Tabela C.2: Potência gerada na barra de referência para o FCL convencional

Barra	Potência gerada (MW)			
	P_1	P_2	P_3	P_4
1	239,0542	244,3770	266,4022	271,7730

C Resultados completos para o IEEE30 utilizando os fluxos linearizados

Tabela C.3: Fluxo ativo nos ramos para o FCL convencional

Barra	Fluxo ativo (MW)			
	P_1	P_2	P_3	P_4
1 2	163,2138	166,8566	181,7762	185,4537
1 3	75,8404	77,5205	84,6260	86,3193
2 4	42,5816	43,5097	47,5849	48,5170
3 4	72,1787	73,7491	80,3402	81,9171
2 5	75,5264	77,1507	82,9224	84,5516
2 6	57,8729	59,1306	64,4654	65,7281
4 6	67,7915	69,2536	74,8731	76,3395
5 7	-15,2443	-15,5587	-15,6357	-15,9503
6 7	36,6530	37,4321	39,8113	40,5912
6 8	28,1462	28,7421	30,6923	31,2886
6 9	26,1701	26,7363	29,6232	30,1902
6 10	14,9678	15,2916	16,9428	17,2671
9 11	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
9 10	26,1701	26,7363	29,6232	30,1902
4 12	38,9131	39,7550	43,8532	44,6966
12 13	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
12 14	6,9915	7,1427	7,8847	8,0361
12 15	15,5592	15,8957	17,5302	17,8673
12 16	5,8464	5,9723	6,5517	6,6777
14 15	1,2007	1,2268	1,3432	1,3693
16 17	2,5761	2,6314	2,8575	2,9129
15 18	5,1806	5,2921	5,8218	5,9333
18 19	2,1919	2,2388	2,4457	2,4927
19 20	-6,6504	-6,7937	-7,5386	-7,6819
10 20	8,7318	8,9207	9,8941	10,0832
10 17	5,8009	5,9260	6,6014	6,7265
10 21	14,3028	14,6118	16,1613	16,4707
10 22	6,8315	6,9793	7,7209	7,8689
21 22	-2,0014	-2,0437	-2,2509	-2,2930
15 23	3,8723	3,9558	4,3392	4,4229
22 24	4,8071	4,9116	5,4406	5,5454
23 24	0,8899	0,9092	0,9713	0,9906
24 25	-2,4079	-2,4587	-2,7410	-2,7915
25 26	3,2643	3,3347	3,6869	3,7573
25 27	-5,6999	-5,8223	-6,4633	-6,5857
28 27	17,9842	18,3751	20,3612	20,7531
27 29	5,6933	5,8169	6,4357	6,5596
27 30	6,4977	6,6385	7,3431	7,4841
29 30	3,4231	3,4971	3,8670	3,9410
8 28	-0,3976	-0,4035	-0,2596	-0,2654
6 28	18,4078	18,8058	20,6536	21,0525

Tabela C.4: Perdas ativas na transmissão para o FCL convencional

Barra	Perdas ativas (MW)			
	P_1	P_2	P_3	P_4
1 2	4,6016	4,8093	5,7078	5,9411
1 3	2,4536	2,5636	3,0551	3,1785
2 4	0,9330	0,9742	1,1652	1,2113
3 4	0,6133	0,6403	0,7598	0,7900
2 5	2,5480	2,6588	3,0715	3,1934
2 6	1,7553	1,8324	2,1780	2,2641
4 6	0,5052	0,5272	0,6162	0,6406
5 7	0,0924	0,0962	0,0972	0,1011
6 7	0,3243	0,3382	0,3826	0,3978
6 8	0,0879	0,0917	0,1045	0,1086
6 9	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
6 10	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
9 11	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
9 10	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
4 12	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
12 13	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
12 14	0,0489	0,0510	0,0621	0,0646
12 15	0,1274	0,1330	0,1618	0,1680
12 16	0,0263	0,0275	0,0331	0,0344
14 15	0,0014	0,0015	0,0018	0,0019
16 17	0,0046	0,0048	0,0057	0,0059
15 18	0,0232	0,0242	0,0293	0,0304
18 19	0,0025	0,0026	0,0031	0,0032
19 20	0,0120	0,0126	0,0155	0,0161
10 20	0,0594	0,0620	0,0763	0,0793
10 17	0,0095	0,0099	0,0123	0,0128
10 21	0,0586	0,0611	0,0748	0,0776
10 22	0,0275	0,0287	0,0351	0,0364
21 22	0,0004	0,0004	0,0005	0,0005
15 23	0,0120	0,0126	0,0151	0,0157
22 24	0,0188	0,0196	0,0241	0,0250
23 24	0,0008	0,0009	0,0010	0,0010
24 25	0,0082	0,0086	0,0107	0,0111
25 26	0,0187	0,0195	0,0239	0,0248
25 27	0,0279	0,0291	0,0358	0,0372
28 27	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
27 29	0,0557	0,0581	0,0711	0,0739
27 30	0,1054	0,1100	0,1346	0,1399
29 30	0,0220	0,0229	0,0280	0,0291
8 28	0,0001	0,0001	0,0000	0,0000
6 28	0,0530	0,0554	0,0668	0,0694

Tabela C.5: Ângulos para o FCLT

Barra	Ângulos (graus)			
	P_1	P_2	P_3	P_4
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	-6,1954	-6,0660	-5,4188	-5,2894
3	-9,2231	-9,0457	-8,1588	-7,9814
4	-11,0194	-10,8068	-9,7436	-9,5310
5	-15,9075	-15,6013	-14,0702	-13,7639
6	-12,8512	-12,6036	-11,3655	-11,1179
7	-14,7946	-14,5102	-13,0880	-12,8036
8	-13,6162	-13,3543	-12,0450	-11,7831
9	-16,4425	-16,1283	-14,5574	-14,2432
10	-18,3418	-17,9924	-16,2453	-15,8959
11	-16,4425	-16,1283	-14,5574	-14,2432
12	-17,5788	-17,2439	-15,5697	-15,2349
13	-17,5788	-17,2439	-15,5697	-15,2349
14	-18,7573	-18,4005	-16,6165	-16,2597
15	-18,9146	-18,5549	-16,7561	-16,3964
16	-18,3420	-17,9928	-16,2467	-15,8975
17	-18,6660	-18,3106	-16,5336	-16,1782
18	-19,6592	-19,2855	-17,4168	-17,0431
19	-19,8450	-19,4677	-17,5814	-17,2041
20	-19,5464	-19,1746	-17,3161	-16,9444
21	-19,0480	-18,6855	-16,8728	-16,5103
22	-19,0169	-18,6550	-16,8453	-16,4833
23	-19,4284	-19,0590	-17,2120	-16,8426
24	-19,5844	-19,2120	-17,3500	-16,9776
25	-19,0592	-18,6967	-16,8844	-16,5219
26	-19,8769	-19,4992	-17,6106	-17,2329
27	-18,2734	-17,9255	-16,1865	-15,8387
28	-13,5752	-13,3142	-12,0092	-11,7482
29	-19,8321	-19,4554	-17,5720	-17,1954
30	-20,8550	-20,4593	-18,4807	-18,0850

Tabela C.6: Fluxo ativo nos ramos para o FCLT

Barra	Fluxo ativo (MW)			
	P_1	P_2	P_3	P_4
1 2	160,5529	164,4813	184,1232	188,0516
1 3	75,2171	76,8887	85,2468	86,9184
2 4	42,4245	43,3162	47,7749	48,6666
3 4	71,1885	72,8609	81,2231	82,8956
2 5	74,5234	76,0981	83,9713	85,5459
2 6	57,5553	58,7669	64,8249	66,0365
4 6	66,4997	68,0889	76,0345	77,6237
5 7	-20,3391	-18,9843	-12,2103	-10,8555
6 7	33,2885	34,8123	42,4310	43,9547
6 8	27,6303	28,2265	31,2076	31,8038
6 9	25,9845	26,6116	29,7471	30,3742
6 10	14,8616	15,2203	17,0136	17,3723
9 11	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
9 10	25,9845	26,6116	29,7471	30,3742
4 12	38,8610	39,7017	43,9051	44,7458
12 13	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
12 14	6,9020	7,0767	7,9505	8,1252
12 15	15,2403	15,6610	17,7643	18,1850
12 16	5,2533	5,5415	6,9824	7,2706
14 15	0,6688	0,8448	1,7250	1,9011
16 17	1,7535	2,0366	3,4522	3,7353
15 18	4,6003	4,8736	6,2402	6,5135
18 19	1,4135	1,6789	3,0056	3,2710
19 20	-8,2127	-7,9137	-6,4186	-6,1196
10 20	8,3090	8,6228	10,1918	10,5056
10 17	4,9750	5,3432	7,1842	7,5524
10 21	14,0913	14,4613	16,3114	16,6814
10 22	6,6919	6,8799	7,8200	8,0081
21 22	-3,2596	-2,9418	-1,3530	-1,0352
15 23	3,1381	3,4265	4,8684	5,1568
22 24	3,9450	4,2967	6,0552	6,4069
23 24	-0,0369	0,2423	1,6381	1,9173
24 25	-3,8057	-3,4612	-1,7388	-1,3943
25 26	3,2658	3,3358	3,6858	3,7558
25 27	-7,3391	-6,9973	-5,2884	-4,9466
28 27	17,9080	18,3251	20,4102	20,8272
27 29	5,7016	5,8229	6,4294	6,5507
27 30	6,5052	6,6439	7,3374	7,4761
29 30	3,3306	3,4310	3,9330	4,0334
8 28	-0,9134	-0,7472	0,0838	0,2501
6 28	18,3102	18,7157	20,7428	21,1482

Tabela C.7: Ângulos para o FCLS

Barra	Ângulos (graus)			
	m	α	$m - \alpha$	$m + \alpha$
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	-5,7424	0,2793	-6,0217	-5,4631
3	-8,6022	0,3973	-8,9995	-8,2050
4	-10,2752	0,4729	-10,7481	-9,8024
5	-14,8357	0,6035	-15,4393	-14,2322
6	-11,9846	0,5416	-12,5262	-11,4429
7	-13,7991	0,5990	-14,3981	-13,2001
8	-12,6997	0,5651	-13,2648	-12,1346
9	-15,3428	0,7133	-16,0561	-14,6296
10	-17,1189	0,8040	-17,9229	-16,3148
11	-15,3428	0,7133	-16,0561	-14,6296
12	-16,4068	0,7742	-17,1810	-15,6326
13	-16,4068	0,7742	-17,1810	-15,6326
14	-17,5085	0,8287	-18,3372	-16,6798
15	-17,6555	0,8354	-18,4909	-16,8201
16	-17,1197	0,8075	-17,9272	-16,3122
17	-17,4221	0,8202	-18,2423	-16,6019
18	-18,3512	0,8688	-19,2199	-17,4824
19	-18,5246	0,8765	-19,4011	-17,6480
20	-18,2454	0,8621	-19,1074	-17,3833
21	-17,7791	0,8372	-18,6164	-16,9419
22	-17,7501	0,8358	-18,5859	-16,9143
23	-18,1355	0,8578	-18,9933	-17,2777
24	-18,2810	0,8629	-19,1438	-17,4181
25	-17,7905	0,8364	-18,6270	-16,9541
26	-18,5549	0,8748	-19,4297	-17,6801
27	-17,0560	0,7982	-17,8543	-16,2578
28	-12,6617	0,5733	-13,2350	-12,0884
29	-18,5137	0,8718	-19,3856	-17,6419
30	-19,4700	0,9199	-20,3899	-18,5502

Tabela C.8: Potência gerada na barra de referência para o FCLS

Barra	Potência gerada (MW)			
	m	α	$m - \alpha$	$m + \alpha$
1	255,3700	12,2221	243,1479	267,5921

Tabela C.9: Fluxo ativo nos ramos para o FCLS

Barra	Fluxo ativo (MW)			
	m	α	$m - \alpha$	$m + \alpha$
1 2	174,3023	8,4783	165,8240	182,7806
1 3	81,0678	3,7438	77,3240	84,8115
2 4	45,5455	1,9448	43,6008	47,4903
3 4	77,0420	3,4818	73,5602	80,5239
2 5	80,0347	2,8533	77,1814	82,8880
2 6	61,7959	2,5970	59,1989	64,3929
4 6	72,0617	2,8996	69,1621	74,9613
5 7	-15,5973	0,0684	-15,6658	-15,5289
6 7	38,6216	1,2198	37,4018	39,8414
6 8	29,7171	0,9747	28,7423	30,6918
6 9	28,1794	1,4400	26,7394	29,6193
6 10	16,1170	0,8236	15,2934	16,9405
9 11	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
9 10	28,1794	1,4400	26,7394	29,6193
4 12	41,8034	2,0544	39,7490	43,8578
12 13	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
12 14	7,5136	0,3717	7,1419	7,8852
12 15	16,7127	0,8196	15,8931	17,5322
12 16	6,2619	0,2923	5,9696	6,5542
14 15	1,2849	0,0589	1,2260	1,3439
16 17	2,7444	0,1157	2,6287	2,8602
15 18	5,5569	0,2663	5,2906	5,8232
18 19	2,3423	0,1049	2,2373	2,4472
19 20	-7,1661	0,3709	-7,5370	-6,7952
10 20	9,4073	0,4850	8,9223	9,8923
10 17	6,2637	0,3351	5,9287	6,5988
10 21	15,3864	0,7742	14,6122	16,1606
10 22	7,3500	0,3705	6,9795	7,7204
21 22	-2,1474	0,1041	-2,2515	-2,0433
15 23	4,1475	0,1934	3,9541	4,3408
22 24	5,1759	0,2638	4,9122	5,4397
23 24	0,9402	0,0327	0,9075	0,9729
24 25	-2,6000	0,1401	-2,7401	-2,4599
25 26	3,5108	0,1760	3,3347	3,6868
25 27	-6,1429	0,3194	-6,4623	-5,8234
28 27	19,3676	0,9914	18,3762	20,3590
27 29	6,1262	0,3092	5,8169	6,4354
27 30	6,9906	0,3522	6,6385	7,3428
29 30	3,6820	0,1849	3,4971	3,8669
8 28	-0,3317	0,0716	-0,4033	-0,2601
6 28	19,7292	0,9225	18,8067	20,6517

Tabela C.10: Perdas ativas na transmissão
para o FCLS

Barra	Perdas ativas (MW)			
	m	α	$m - \alpha$	$m + \alpha$
1 2	5,2480	0,4981	4,7499	5,7461
1 3	2,8035	0,2529	2,5505	3,0565
2 4	1,0674	0,0892	0,9782	1,1566
3 4	0,6987	0,0617	0,6369	0,7604
2 5	2,8613	0,2003	2,6609	3,0616
2 6	2,0013	0,1646	1,8366	2,1660
4 6	0,5707	0,0450	0,5257	0,6158
5 7	0,0967	0,0008	0,0958	0,0975
6 7	0,3600	0,0223	0,3377	0,3824
6 8	0,0979	0,0063	0,0916	0,1042
6 9	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
6 10	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
9 11	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
9 10	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
4 12	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
12 13	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
12 14	0,0564	0,0054	0,0509	0,0618
12 15	0,1470	0,0140	0,1329	0,1610
12 16	0,0302	0,0027	0,0274	0,0329
14 15	0,0016	0,0001	0,0014	0,0017
16 17	0,0052	0,0004	0,0048	0,0056
15 18	0,0266	0,0024	0,0241	0,0291
18 19	0,0028	0,0002	0,0025	0,0030
19 20	0,0139	0,0014	0,0125	0,0153
10 20	0,0689	0,0069	0,0620	0,0759
10 17	0,0110	0,0011	0,0099	0,0122
10 21	0,0677	0,0066	0,0611	0,0744
10 22	0,0317	0,0031	0,0286	0,0349
21 22	0,0004	0,0000	0,0004	0,0004
15 23	0,0138	0,0012	0,0125	0,0150
22 24	0,0218	0,0021	0,0196	0,0239
23 24	0,0009	0,00006	0,0009	0,0010
24 25	0,0095	0,0010	0,0085	0,0106
25 26	0,0216	0,0021	0,0195	0,0237
25 27	0,0323	0,0032	0,0290	0,0356
28 27	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
27 29	0,0644	0,0063	0,0580	0,0707
27 30	0,1220	0,0119	0,1100	0,1340
29 30	0,0254	0,0024	0,0229	0,0278
8 28	0,0000	0,000025	0,00004	0,00008
6 28	0,0609	0,0056	0,0553	0,0664

Apêndice D

Resultados completos para o IEEE30 utilizando o FCN convencional

As tabelas que referem-se a simulação com todas as potências nas barras sendo nebulosas, estão referenciadas como sendo sistema completo (tabelas D.1 à D.7). E as tabelas para simulação com parte das barras do sistema tendo as potências constantes estão referenciadas como sendo sistema parcial (tabelas D.8 à D.14).

Tabela D.1: Magnitudes das tensões para o FCN convencional - sistema completo

Barra	Magnitudes das Tensões para o FCN (p.u.)				
	P_1	P_2	$P_{médio}$	P_3	P_4
1	1,0600	1,0600	1,0600	1,0600	1,0600
2	1,0430	1,0430	1,0450	1,0430	1,0430
3	1,0237	1,0232	1,0225	1,0207	1,0202
4	1,0153	1,0147	1,0140	1,0120	1,0115
5	1,0100	1,0100	1,0100	1,0100	1,0100
6	1,0137	1,0133	1,0126	1,0112	1,0107
7	1,0051	1,0046	1,0038	1,0025	1,0020
8	1,0100	1,0100	1,0100	1,0100	1,0100
9	1,0546	1,0539	1,0524	1,0504	1,0497
10	1,0503	1,0492	1,0466	1,0434	1,0422
11	1,0820	1,0820	1,0820	1,0820	1,0820
12	1,0591	1,0583	1,0567	1,0546	1,0538
13	1,0710	1,0710	1,0710	1,0710	1,0710
14	1,0456	1,0445	1,0421	1,0391	1,0380
15	1,0418	1,0406	1,0379	1,0346	1,0333
16	1,0488	1,0477	1,0453	1,0424	1,0413
17	1,0449	1,0437	1,0409	1,0375	1,0363
18	1,0336	1,0322	1,0288	1,0249	1,0234
19	1,0316	1,0301	1,0266	1,0225	1,0209
20	1,0356	1,0341	1,0308	1,0269	1,0254
21	1,0389	1,0375	1,0342	1,0304	1,0289
22	1,0394	1,0380	1,0348	1,0309	1,0295
23	1,0328	1,0313	1,0279	1,0239	1,0224
24	1,0286	1,0269	1,0230	1,0185	1,0168
25	1,0247	1,0231	1,0196	1,0155	1,0139
26	1,0084	1,0065	1,0020	0,9969	0,9949
27	1,0301	1,0289	1,0261	1,0226	1,0213
28	1,0126	1,0121	1,0113	1,0097	1,0092
29	1,0119	1,0102	1,0063	1,0017	0,9999
30	1,0013	0,9994	0,9948	0,9896	0,9876

Tabela D.2: Ângulos para o FCN convencional - sistema completo

Barra	Ângulos (graus)				
	P_1	P_2	$P_{\text{médio}}$	P_3	P_4
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	-5,1226	-5,2462	-5,5273	-5,7549	-5,8807
3	-7,4576	-7,6313	-7,9932	-8,3664	-8,5424
4	-8,9965	-9,2078	-9,6475	-10,1020	-10,3164
5	-13,4730	-13,7914	-14,3729	-14,9964	-15,3190
6	-10,6492	-10,8997	-11,4110	-11,9483	-12,2026
7	-12,2987	-12,5874	-13,1535	-13,7527	-14,0455
8	-11,2994	-11,5722	-12,1190	-12,7061	-12,9833
9	-13,7345	-14,0540	-14,7403	-15,4574	-15,7822
10	-15,2739	-15,6290	-16,4056	-17,2155	-17,5768
11	-13,7345	-14,0540	-14,7403	-15,4574	-15,7822
12	-14,7581	-15,1044	-15,8674	-16,6621	-17,0147
13	-14,7581	-15,1044	-15,8674	-16,6621	-17,0147
14	-15,5586	-15,9233	-16,7310	-17,5720	-17,9434
15	-15,6249	-15,9901	-16,7984	-17,6398	-18,0118
16	-15,2314	-15,5871	-16,3705	-17,1864	-17,5486
17	-15,4529	-15,8126	-16,6026	-17,4259	-17,7921
18	-16,1413	-16,5183	-17,3539	-18,2239	-18,6080
19	-16,2714	-16,6512	-17,4925	-18,3686	-18,7556
20	-16,0751	-16,4499	-17,2780	-18,1405	-18,5224
21	-15,6885	-16,0531	-16,8538	-17,6885	-18,0597
22	-15,6777	-16,0419	-16,8417	-17,6755	-18,0464
23	-15,9419	-16,3131	-17,1340	-17,9890	-18,3672
24	-16,0459	-16,4175	-17,2360	-18,0893	-18,4678
25	-15,6026	-15,9686	-16,7697	-17,6060	-17,9788
26	-15,9867	-16,3623	-17,1874	-18,0487	-18,4316
27	-15,0901	-15,4467	-16,2221	-17,0324	-17,3955
28	-11,2688	-11,5329	-12,0737	-12,6441	-12,9122
29	-16,2169	-16,6010	-17,4451	-18,3269	-18,7187
30	-17,0235	-17,4279	-18,3228	-19,2577	-19,6708

Tabela D.3: Potência ativa gerada para o FCN convencional - sistema completo

Barra	Potência ativa gerada (MW)				
	P_1	P_2	$P_{\text{médio}}$	P_3	P_4
1	243,8785	249,4528	261,0011	272,6213	278,2924

Tabela D.4: Potência reativa gerada para o FCN convencional - sistema completo

Barra	Potência reativa gerada (MW)				
	P_1	P_2	$P_{\text{médio}}$	P_3	P_4
1	-14,9508	-15,7611	-21,1628	-18,7545	-19,4880
2	30,9993	32,4667	42,2062	39,0980	40,7135
5	13,6496	14,7886	15,5955	18,9988	20,1833
8	-4,4960	-3,0661	-0,8582	3,6715	5,1777
11	14,2724	14,6329	15,4106	16,4491	16,8281
13	9,1284	9,6918	10,9356	12,5522	13,1453

D Resultados completos para o IEEE30 utilizando o FCN convencional

Tabela D.5: Fluxo de potência ativa para o FCN convencional - sistema completo

Barra	Fluxo de potência ativa (MW)				
	P_1	P_2	$P_{\text{médio}}$	P_3	P_4
1 2	166,1773	170,0062	177,9403	185,7847	189,6918
1 3	77,7012	79,4465	83,0609	86,8366	88,6006
2 4	42,5245	43,4613	45,5608	47,6086	48,5558
3 4	73,0219	74,6084	77,8663	81,2604	82,8511
2 5	78,1908	79,9413	83,0375	86,2024	87,9729
2 6	58,0819	59,3643	62,1426	64,8492	66,1475
4 6	67,5507	68,9819	71,6974	74,4595	75,8919
5 7	-13,9602	-14,2132	-14,1537	-14,0538	-14,3006
6 7	35,6272	36,3580	37,4663	38,5397	39,2666
6 8	27,9652	28,5673	29,5528	30,5487	31,1543
6 9	27,0527	27,6277	29,0995	30,5675	31,1453
6 10	14,9615	15,2758	16,0813	16,8808	17,1956
9 11	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
9 10	27,0527	27,6277	29,0996	30,5675	31,1453
4 12	39,2994	40,1667	42,2649	44,3919	45,2627
12 13	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
12 14	7,1021	7,2603	7,6483	8,0409	8,2001
12 15	15,8765	16,2274	17,0743	17,9349	18,2880
12 16	5,9049	6,0391	6,3423	6,6561	6,7907
14 15	1,2754	1,3067	1,3774	1,4520	1,4838
16 17	2,6143	2,6766	2,8003	2,9339	2,9963
15 18	5,1356	5,2522	5,5263	5,8065	5,9234
18 19	2,1316	2,1827	2,2933	2,4096	2,4608
19 20	-6,7063	-6,8454	-7,2101	-7,5692	-7,7082
10 20	8,8457	9,0328	9,5185	9,9992	10,1869
10 17	5,7772	5,8958	6,2247	6,5436	6,6624
10 21	14,8201	15,1357	15,9271	16,7216	17,0387
10 22	7,1771	7,3291	7,7106	8,0939	8,2469
21 22	-1,5510	-1,5898	-1,6850	-1,7780	-1,8159
15 23	4,2159	4,3090	4,5210	4,7426	4,8367
22 24	5,5800	5,6910	5,9718	6,2562	6,3686
23 24	1,2174	1,2454	1,2943	1,3525	1,3811
24 25	-1,3377	-1,3748	-1,4856	-1,5841	-1,6195
25 26	3,2930	3,3648	3,5444	3,7245	3,7966
25 27	-4,6409	-4,7499	-5,0406	-5,3195	-5,4271
28 27	16,9929	17,3744	18,3480	19,3124	19,6948
27 29	5,7467	5,8730	6,1893	6,5067	6,6338
27 30	6,5828	6,7279	7,0912	7,4558	7,6020
29 30	3,4414	3,5162	3,7035	3,8911	3,9662
8 28	-0,6263	-0,6281	-0,5498	-0,4645	-0,4653
6 28	17,6731	18,0584	18,9587	19,8437	20,2296

Tabela D.6: Fluxo de potência reativa para o FCN convencional - sistema completo

Barra	Fluxo de potência reativa (MW)				
	P_1	P_2	$P_{\text{médio}}$	P_3	P_4
1 2	-19,4363	-20,3401	-25,7734	-23,9725	-24,8492
1 3	4,4855	4,5789	4,6106	5,2179	5,3612
2 4	2,0716	2,1586	3,2652	2,7108	2,8252
3 4	-2,2276	-2,6145	-3,6146	-4,1464	-4,5431
2 5	2,1041	1,9528	2,7275	1,4605	1,3352
2 6	-1,0452	-1,0916	-0,1802	-1,0968	-1,1171
4 6	-14,8960	-15,5861	-16,5687	-18,4975	-19,2112
5 7	8,9798	9,4653	10,1708	11,2941	11,7928
6 7	-1,2968	-1,4995	-1,5736	-2,0482	-2,2573
6 8	0,6003	-0,5756	-2,3463	-6,1023	-7,3328
6 9	-7,8864	-7,7247	-7,2261	-6,8795	-6,7089
6 10	-0,1414	0,0108	0,4243	0,7941	0,9541
9 11	-13,9105	-14,2524	-14,9887	-15,9684	-16,3249
9 10	4,4168	4,8605	5,9391	7,0919	7,5494
4 12	13,1799	13,3181	13,8436	14,0743	14,2245
12 13	-9,0267	-9,5772	-10,7896	-12,3599	-12,9344
12 14	2,1962	2,2587	2,4171	2,5804	2,6444
12 15	6,0601	6,2471	6,7171	7,2068	7,3988
12 16	2,7084	2,8125	3,0743	3,3514	3,4578
14 15	0,5821	0,6066	0,6697	0,7363	0,7614
16 17	0,9597	1,0238	1,1859	1,3622	1,4279
15 18	1,4145	1,4686	1,6058	1,7506	1,8058
18 19	0,5203	0,5536	0,6387	0,7305	0,7643
19 20	-2,6475	-2,6826	-2,7683	-2,8473	-2,8819
10 20	3,5032	3,5612	3,7058	3,8452	3,9040
10 17	4,4889	4,5431	4,6772	4,7974	4,8505
10 21	9,2132	9,4244	9,9528	10,4860	10,6997
10 22	4,2165	4,3149	4,5608	4,8095	4,9092
21 22	-1,4096	-1,4319	-1,4884	-1,5420	-1,5634
15 23	2,5634	2,6543	2,8835	3,1246	3,2173
22 24	2,7119	2,7835	2,9615	3,1442	3,2173
23 24	1,0301	1,0865	1,2296	1,3837	1,4414
24 25	1,9898	1,9658	1,9089	1,8614	1,8391
25 26	2,1957	2,2444	2,3664	2,4889	2,5381
25 27	-0,2238	-0,2966	-0,4759	-0,6465	-0,7181
28 27	4,5163	4,7281	5,2672	5,8136	6,0390
27 29	1,5327	1,5709	1,6675	1,7662	1,8061
27 30	1,5228	1,5620	1,6612	1,7630	1,8042
29 30	0,5573	0,5709	0,6055	0,6406	0,6548
8 28	-3,2944	-3,0545	-2,6432	-1,9081	-1,6547
6 28	-9,7198	-9,7269	-9,5578	-9,6803	-9,6840

D Resultados completos para o IEEE30 utilizando o FCN convencional

Tabela D.7: Perdas ativas na transmissão para o FCN convencional - sistema completo

Barra	Perdas ativas (MW)				
	P_1	P_2	$P_{\text{médio}}$	P_3	P_4
1 2	4,7652	4,9904	5,4994	5,9735	6,2306
1 3	2,4472	2,5581	2,7945	3,0561	3,1815
2 4	0,9562	0,9988	1,0980	1,1993	1,2476
3 4	0,6721	0,7024	0,7668	0,8384	0,8728
2 5	2,6610	2,7805	2,9911	3,2302	3,3636
2 6	1,8023	1,8826	2,0564	2,2465	2,3373
4 6	0,5508	0,5764	0,6250	0,6819	0,7109
5 7	0,1332	0,1409	0,1470	0,1577	0,1665
6 7	0,3299	0,3439	0,3656	0,3882	0,4035
6 8	0,0915	0,0954	0,1026	0,1133	0,1196
6 9	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
6 10	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
9 11	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
9 10	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
4 12	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
12 13	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
12 14	0,0607	0,0635	0,0709	0,0789	0,0823
12 15	0,1704	0,1787	0,1996	0,2224	0,2320
12 16	0,0356	0,0374	0,0420	0,0472	0,0494
14 15	0,0040	0,0042	0,0048	0,0054	0,0057
16 17	0,0058	0,0062	0,0070	0,0079	0,0084
15 18	0,0281	0,0295	0,0330	0,0369	0,0385
18 19	0,0029	0,0030	0,0034	0,0039	0,0041
19 20	0,0166	0,0173	0,0192	0,0213	0,0221
10 20	0,0768	0,0802	0,0892	0,0987	0,1025
10 17	0,0157	0,0163	0,0179	0,0196	0,0203
10 21	0,0961	0,1005	0,1121	0,1245	0,1297
10 22	0,0457	0,0478	0,0533	0,0592	0,0616
21 22	0,0005	0,0005	0,0005	0,0006	0,0006
15 23	0,0224	0,0237	0,0267	0,0301	0,0316
22 24	0,0410	0,0428	0,0477	0,0530	0,0552
23 24	0,0031	0,0034	0,0040	0,0047	0,0050
24 25	0,0102	0,0103	0,0105	0,0109	0,0109
25 26	0,0380	0,0398	0,0444	0,0495	0,0516
25 27	0,0225	0,0236	0,0269	0,0304	0,0319
28 27	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
27 29	0,0733	0,0767	0,0858	0,0955	0,0996
27 30	0,1378	0,1443	0,1613	0,1797	0,1874
29 30	0,0285	0,0298	0,0334	0,0372	0,0388
8 28	0,0010	0,0007	0,0003	0,0002	0,0003
6 28	0,0529	0,0552	0,0606	0,0666	0,0692

Tabela D.8: Magnitudes das tensões para o FCN convencional - sistema parcial

Barra	Magnitudes das Tensões para o FCN (p.u.)				
	P_1	P_2	$P_{\text{médio}}$	P_3	P_4
1	1,0600	1,0600	1,0600	1,0600	1,0600
2	1,0430	1,0430	1,0430	1,0430	1,0430
3	1,0229	1,0226	1,0220	1,0213	1,0210
4	1,0145	1,0142	1,0134	1,0126	1,0123
5	1,0100	1,0100	1,0100	1,0100	1,0100
6	1,0131	1,0129	1,0122	1,0116	1,0113
7	1,0041	1,0039	1,0036	1,0032	1,0030
8	1,0100	1,0100	1,0100	1,0100	1,0100
9	1,0540	1,0535	1,0521	1,0508	1,0502
10	1,0496	1,0487	1,0463	1,0440	1,0430
11	1,0820	1,0820	1,0820	1,0820	1,0820
12	1,0581	1,0577	1,0565	1,0553	1,0548
13	1,0710	1,0710	1,0710	1,0710	1,0710
14	1,0441	1,0435	1,0418	1,0401	1,0395
15	1,0408	1,0399	1,0376	1,0353	1,0344
16	1,0479	1,0471	1,0450	1,0430	1,0421
17	1,0442	1,0432	1,0407	1,0381	1,0371
18	1,0327	1,0315	1,0286	1,0256	1,0244
19	1,0308	1,0295	1,0263	1,0231	1,0218
20	1,0348	1,0336	1,0306	1,0275	1,0263
21	1,0381	1,0369	1,0340	1,0309	1,0297
22	1,0386	1,0375	1,0345	1,0315	1,0303
23	1,0319	1,0307	1,0276	1,0246	1,0233
24	1,0278	1,0263	1,0227	1,0191	1,0176
25	1,0241	1,0227	1,0193	1,0159	1,0145
26	1,0078	1,0060	1,0017	0,9973	0,9955
27	1,0296	1,0285	1,0258	1,0229	1,0218
28	1,0122	1,0118	1,0109	1,0101	1,0097
29	1,0114	1,0098	1,0060	1,0020	1,0005
30	1,0008	0,9990	0,9945	0,9900	0,9881

D Resultados completos para o IEEE30 utilizando o FCN convencional

Tabela D.9: Ângulos para o FCN convencional - sistema parcial

Barra	Ângulos (graus)				
	P_1	P_2	$P_{\text{médio}}$	P_3	P_4
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	-5,3599	-5,3997	-5,4996	-5,6000	-5,6403
3	-7,7761	-7,8394	-7,9978	-8,1569	-8,2207
4	-9,3824	-9,4597	-9,6536	-9,8482	-9,9262
5	-14,1584	-14,2250	-14,3922	-14,5602	-14,6276
6	-11,1097	-11,1988	-11,4224	-11,6469	-11,7370
7	-12,8874	-12,9675	-13,1683	-13,3700	-13,4510
8	-11,8027	-11,8981	-12,1373	-12,3777	-12,4741
9	-14,2384	-14,3852	-14,7533	-15,1234	-15,2719
10	-15,7999	-15,9763	-16,4193	-16,8649	-17,0439
11	-14,2384	-14,3852	-14,7533	-15,1234	-15,2719
12	-15,2999	-15,4652	-15,8803	-16,2979	-16,4657
13	-15,2999	-15,4652	-15,8803	-16,2979	-16,4657
14	-16,1257	-16,3020	-16,7444	-17,1897	-17,3685
15	-16,1719	-16,3542	-16,8118	-17,2723	-17,4573
16	-15,7670	-15,9427	-16,3838	-16,8275	-17,0057
17	-15,9821	-16,1627	-16,6162	-17,0724	-17,2557
18	-16,6819	-16,8773	-17,3677	-17,8613	-18,0597
19	-16,8080	-17,0069	-17,5065	-18,0093	-18,2114
20	-16,6091	-16,8036	-17,2919	-17,7834	-17,9809
21	-16,2148	-16,4007	-16,8677	-17,3375	-17,5263
22	-16,2039	-16,3896	-16,8556	-17,3246	-17,5130
23	-16,4801	-16,6703	-17,1478	-17,6283	-17,8215
24	-16,5716	-16,7648	-17,2501	-17,7385	-17,9348
25	-16,1111	-16,3028	-16,7841	-17,2687	-17,4634
26	-16,4957	-16,6968	-17,2021	-17,7110	-17,9156
27	-15,5876	-15,7724	-16,2365	-16,7037	-16,8914
28	-11,7416	-11,8400	-12,0868	-12,3346	-12,4339
29	-16,7155	-16,9275	-17,4603	-17,9972	-18,2132
30	-17,5229	-17,7550	-18,3386	-18,9273	-19,1642

Tabela D.10: Potência ativa gerada para o FCN convencional - sistema parcial

Barra	Potência ativa gerada (MW)				
	P_1	P_2	$P_{\text{médio}}$	P_3	P_4
1	254,4219	256,2963	260,9967	265,7181	267,6127

Tabela D.11: Potência reativa gerada para o FCN convencional - sistema parcial

Barra	Potência reativa gerada (MW)				
	P_1	P_2	$P_{\text{médio}}$	P_3	P_4
1	-16,5808	-16,7862	-17,2905	-17,7818	-17,9746
2	33,5949	34,1968	35,7210	37,2731	37,9019
5	16,4130	16,5441	16,8766	17,2158	17,3534
8	-2,5002	-1,7159	0,2674	2,2836	3,0995
11	14,5405	14,8215	15,5318	16,2534	16,5452
13	9,8491	10,2055	11,1074	12,0250	12,3965

Tabela D.12: Fluxo de potência ativa para o FCN convencional - sistema parcial

Barra	Fluxo de potência ativa (MW)				
	P_1	P_2	$P_{\text{médio}}$	P_3	P_4
1 2	173,5294	174,7644	177,8629	180,9775	182,2279
1 3	80,8924	81,5319	83,1338	84,7407	85,3848
2 4	44,0954	44,5046	45,5303	46,5598	46,9726
3 4	75,8410	76,4382	77,9328	79,4299	80,0294
2 5	82,2180	82,4591	83,0639	83,6719	83,9160
2 6	60,3138	60,8232	62,0998	63,3812	63,8952
4 6	70,2923	70,7004	71,7206	72,7409	73,1490
5 7	-14,9220	-14,6981	-14,1365	-13,5724	-13,3460
6 7	38,2606	38,0297	37,4511	36,8703	36,6374
6 8	29,2914	29,3668	29,5564	29,7473	29,8241
6 9	27,4055	27,8881	29,0961	30,3063	30,7910
6 10	15,1539	15,4179	16,0781	16,7388	17,0032
9 11	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
9 10	27,4056	27,8882	29,0961	30,3063	30,7910
4 12	40,2898	40,8569	42,2775	43,7020	44,2730
12 13	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
12 14	7,3293	7,4208	7,6501	7,8803	7,9726
12 15	15,9304	16,2584	17,0800	17,9040	18,2343
12 16	5,8301	5,9777	6,3474	6,7178	6,8662
14 15	1,0644	1,1542	1,3791	1,6047	1,6951
16 17	2,5403	2,6159	2,8052	2,9949	3,0709
15 18	5,0685	5,2000	5,5292	5,8588	5,9908
18 19	2,0651	2,1310	2,2961	2,4614	2,5275
19 20	-6,7726	-6,8969	-7,2073	-7,5176	-7,6417
10 20	8,9136	9,0855	9,5157	9,9462	10,1186
10 17	5,8513	5,9566	6,2197	6,4826	6,5878
10 21	14,8185	15,1352	15,9278	16,7220	17,0401
10 22	7,1761	7,3288	7,7111	8,0942	8,2477
21 22	-1,5527	-1,5905	-1,6843	-1,7774	-1,8144
15 23	4,1257	4,2396	4,5253	4,8121	4,9271
22 24	5,5772	5,6900	5,9729	6,2571	6,3712
23 24	1,1279	1,1765	1,2985	1,4213	1,4707
24 25	-1,4298	-1,4446	-1,4804	-1,5144	-1,5276
25 26	3,2930	3,3648	3,5445	3,7245	3,7965
25 27	-4,7336	-4,8200	-5,0354	-5,2493	-5,3345
28 27	17,0867	17,4455	18,3429	19,2412	19,6007
27 29	5,7468	5,8731	6,1894	6,5066	6,6337
27 30	6,5830	6,7280	7,0913	7,4557	7,6018
29 30	3,4414	3,5163	3,7035	3,8911	3,9662
8 28	-0,8090	-0,7342	-0,5468	-0,3588	-0,2834
6 28	17,9514	18,2368	18,9507	19,6653	19,9512

Tabela D.13: Fluxo de potência reativa para o FCN convencional - sistema parcial

Barra	Fluxo de potência reativa (MW)				
	P_1	P_2	$P_{\text{médio}}$	P_3	P_4
1 2	-21,1640	-21,4510	-22,1672	-22,8814	-23,1665
1 3	4,5831	4,6648	4,8767	5,0996	5,1919
2 4	2,1538	2,2288	2,4223	2,6241	2,7073
3 4	-3,0537	-3,1461	-3,3768	-3,6067	-3,6984
2 5	1,7649	1,7456	1,6977	1,6503	1,6314
2 6	-1,2290	-1,1954	-1,1059	-1,0086	-0,9675
4 6	-16,2512	-16,4730	-17,0311	-17,5948	-17,8218
5 7	10,2316	10,2713	10,3741	10,4817	10,5262
6 7	-1,5624	-1,6211	-1,7703	-1,9232	-1,9855
6 8	-1,0818	-1,7149	-3,3137	-4,9360	-5,5916
6 9	-7,8828	-7,7200	-7,3072	-6,8861	-6,7153
6 10	-0,0947	0,0449	0,3983	0,7580	0,9037
9 11	-14,1649	-14,4312	-15,1032	-15,7840	-16,0589
9 10	4,6341	5,0136	5,9691	6,9347	7,3238
4 12	13,3002	13,4098	13,6896	13,9777	14,0954
12 13	-9,7307	-10,0784	-10,9568	-11,8485	-12,2089
12 14	2,3003	2,3339	2,4187	2,5047	2,5394
12 15	6,0609	6,2495	6,7244	7,2043	7,3976
12 16	2,6919	2,8025	3,0808	3,3615	3,4744
14 15	0,5654	0,5955	0,6711	0,7476	0,7784
16 17	0,9447	1,0151	1,1922	1,3708	1,4427
15 18	1,4040	1,4623	1,6090	1,7568	1,8163
18 19	0,5112	0,5484	0,6417	0,7356	0,7733
19 20	-2,6563	-2,6875	-2,7652	-2,8425	-2,8733
10 20	3,5153	3,5687	3,7027	3,8374	3,8915
10 17	4,5039	4,5519	4,6709	4,7888	4,8356
10 21	9,2212	9,4301	9,9539	10,4802	10,6914
10 22	4,2218	4,3186	4,5615	4,8058	4,9038
21 22	-1,4019	-1,4265	-1,4874	-1,5475	-1,5712
15 23	2,5563	2,6509	2,8885	3,1281	3,2245
22 24	2,7246	2,7924	2,9630	3,1352	3,2045
23 24	1,0244	1,0842	1,2345	1,3860	1,4470
24 25	1,9904	1,9678	1,9127	1,8594	1,8385
25 26	2,1958	2,2444	2,3664	2,4889	2,5380
25 27	-0,2241	-0,2952	-0,4721	-0,6478	-0,7176
28 27	4,5328	4,7392	5,2637	5,8006	6,0189
27 29	1,5329	1,5711	1,6677	1,7660	1,8058
27 30	1,5231	1,5622	1,6614	1,7627	1,8038
29 30	0,5573	0,5710	0,6055	0,6406	0,6547
8 28	-3,0123	-2,8638	-2,4877	-2,1043	-1,9489
6 28	-9,9641	-9,8917	-9,7059	-9,5131	-9,4341

Tabela D.14: Perdas ativas na transmissão para o FCN convencional - sistema parcial

Barra	Perdas ativas (MW)				
	P_1	P_2	$P_{\text{médio}}$	P_3	P_4
1 2	5,2022	5,2775	5,4688	5,6646	5,7441
1 3	2,6514	2,6936	2,8009	2,9107	2,9554
2 4	1,0279	1,0472	1,0964	1,1471	1,1677
3 4	0,7265	0,7384	0,7687	0,7997	0,8123
2 5	2,9400	2,9572	3,0005	3,0443	3,0620
2 6	1,9432	1,9762	2,0601	2,1461	2,1810
4 6	0,6001	0,6080	0,6278	0,6481	0,6563
5 7	0,1577	0,1551	0,1489	0,1429	0,1406
6 7	0,3809	0,3765	0,3657	0,3550	0,3507
6 8	0,1003	0,1011	0,1033	0,1061	0,1074
6 9	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
6 10	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
9 11	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
9 10	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
4 12	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
12 13	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
12 14	0,0649	0,0666	0,0710	0,0756	0,0775
12 15	0,1718	0,1795	0,1998	0,2214	0,2304
12 16	0,0348	0,0368	0,0421	0,0479	0,0503
14 15	0,0029	0,0034	0,0048	0,0064	0,0071
16 17	0,0055	0,0059	0,0070	0,0082	0,0087
15 18	0,0274	0,0290	0,0330	0,0375	0,0393
18 19	0,0027	0,0029	0,0034	0,0040	0,0043
19 20	0,0169	0,0176	0,0192	0,0210	0,0217
10 20	0,0780	0,0811	0,0891	0,0976	0,1011
10 17	0,0160	0,0166	0,0179	0,0193	0,0199
10 21	0,0962	0,1006	0,1121	0,1244	0,1294
10 22	0,0457	0,0478	0,0533	0,0591	0,0615
21 22	0,0005	0,0005	0,0005	0,0006	0,0006
15 23	0,0217	0,0231	0,0268	0,0307	0,0324
22 24	0,0411	0,0429	0,0478	0,0529	0,0551
23 24	0,0029	0,0032	0,0040	0,0050	0,0054
24 25	0,0107	0,0107	0,0105	0,0104	0,0104
25 26	0,0380	0,0398	0,0445	0,0495	0,0515
25 27	0,0234	0,0244	0,0269	0,0296	0,0308
28 27	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
27 29	0,0733	0,0768	0,0858	0,0955	0,0995
27 30	0,1379	0,1444	0,1614	0,1796	0,1872
29 30	0,0285	0,0299	0,0334	0,0372	0,0387
8 28	0,0008	0,0006	0,0002	0,0001	0,0001
6 28	0,0548	0,0565	0,0608	0,0652	0,0671

Apêndice E

Resultados completos para o IEEE30 utilizando o FCNT

As tabelas que referem-se a simulação com todas as potências nas barras sendo nebulosas, estão referenciadas como sendo sistema completo (tabelas E.1 à E.7). E as tabelas para simulação com parte das barras do sistema tendo as potências constantes estão referenciadas como sendo sistema parcial (tabelas E.8 à E.14).

E Resultados completos para o IEEE30 utilizando o FCNT

Tabela E.1: Magnitudes das tensões para o FCNT - sistema completo

Barra	Magnitudes das Tensões para o FCN (p.u.)			
	P_1	P_2	P_3	P_4
1	1,0600	1,0600	1,0600	1,0600
2	1,0430	1,0430	1,0430	1,0430
3	1,0238	1,0233	1,0206	1,0201
4	1,0154	1,0148	1,0120	1,0114
5	1,0100	1,0100	1,0100	1,0100
6	1,0138	1,0133	1,0112	1,0107
7	1,0051	1,0047	1,0025	1,0020
8	1,0100	1,0100	1,0100	1,0100
9	1,0546	1,0539	1,0504	1,0497
10	1,0504	1,0493	1,0434	1,0422
11	1,0820	1,0820	1,0820	1,0820
12	1,0591	1,0584	1,0546	1,0538
13	1,0710	1,0710	1,0710	1,0710
14	1,0457	1,0446	1,0391	1,0380
15	1,0419	1,0407	1,0346	1,0333
16	1,0488	1,0478	1,0423	1,0413
17	1,0450	1,0438	1,0375	1,0363
18	1,0337	1,0322	1,0249	1,0234
19	1,0317	1,0302	1,0225	1,0209
20	1,0357	1,0342	1,0269	1,0254
21	1,0390	1,0376	1,0304	1,0289
22	1,0395	1,0381	1,0309	1,0295
23	1,0329	1,0314	1,0239	1,0224
24	1,0287	1,0270	1,0185	1,0168
25	1,0248	1,0232	1,0155	1,0139
26	1,0085	1,0066	0,9968	0,9949
27	1,0303	1,0290	1,0225	1,0212
28	1,0127	1,0122	1,0097	1,0092
29	1,0120	1,0103	1,0016	0,9999
30	1,0015	0,9995	0,9896	0,9876

Tabela E.2: Ângulos para o FCNT - sistema completo

Barra	Ângulos (graus)			
	P_1	P_2	P_3	P_4
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	-4,9895	-5,1352	-5,8640	-6,0097
3	-7,3340	-7,5237	-8,4720	-8,6616
4	-8,8473	-9,0777	-10,2294	-10,4598
5	-13,2043	-13,5437	-15,2406	-15,5800
6	-10,4732	-10,7444	-12,1004	-12,3716
7	-12,0743	-12,3869	-13,9497	-14,2623
8	-11,1166	-11,4083	-12,8663	-13,1579
9	-13,5581	-13,8996	-15,6071	-15,9486
10	-15,1007	-15,4774	-17,3612	-17,7379
11	-13,5581	-13,8996	-15,6071	-15,9486
12	-14,5992	-14,9652	-16,7954	-17,1615
13	-14,5992	-14,9652	-16,7954	-17,1615
14	-15,3881	-15,7756	-17,7133	-18,1008
15	-15,4533	-15,8415	-17,7821	-18,1703
16	-15,0615	-15,4393	-17,3282	-17,7060
17	-15,2741	-15,6575	-17,5749	-17,9584
18	-15,9567	-16,3598	-18,3756	-18,7787
19	-16,0824	-16,4893	-18,5237	-18,9305
20	-15,8915	-16,2916	-18,2922	-18,6923
21	-15,4976	-15,8890	-17,8463	-18,2378
22	-15,4887	-15,8793	-17,8320	-18,2225
23	-15,7516	-16,1505	-18,1450	-18,5439
24	-15,8374	-16,2410	-18,2591	-18,6627
25	-15,4009	-15,7961	-17,7721	-18,1673
26	-15,7422	-16,1593	-18,2448	-18,6619
27	-14,9068	-15,2867	-17,1863	-17,5662
28	-11,0859	-11,3719	-12,8017	-13,0876
29	-16,0144	-16,4275	-18,4931	-18,9063
30	-16,8153	-17,2505	-19,4267	-19,8619

Tabela E.3: Potência ativa gerada para o FCNT - sistema completo

Barra	Potência ativa gerada (MW)			
	P_1	P_2	P_3	P_4
1	283,4740	277,0519	244,9415	238,5194

Tabela E.5: Fluxo de potência ativa para o FCNT - sistema completo

Barra	Fluxo de potência ativa (MW)			
	P_1	P_2	P_3	P_4
1 2	162,0394	166,5604	189,1654	193,6863
1 3	76,5831	78,3811	87,8865	89,6845
2 4	42,6311	43,2609	47,7998	48,4295
3 4	72,0882	73,6753	82,1904	83,7775
2 5	76,9698	78,7110	87,4169	89,1581
2 6	57,8413	58,9285	65,2711	66,3583
4 6	66,2445	68,0160	75,4252	77,1967
5 7	-15,3623	-14,6659	-13,6071	-12,9107
6 7	34,7015	35,4803	39,4219	40,2007
6 8	26,8276	28,2652	30,8476	32,2852
6 9	27,0345	27,6428	30,5495	31,1578
6 10	14,9399	15,2936	16,8627	17,2163
9 11	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
9 10	27,0812	27,6890	30,5033	31,1111
4 12	39,2302	40,1190	44,4359	45,3247
12 13	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
12 14	7,2207	7,2092	8,0910	8,0795
12 15	16,2414	16,1147	18,0453	17,9186
12 16	6,0471	5,9683	6,7265	6,6476
14 15	1,3765	1,3000	1,4583	1,3817
16 17	2,6559	2,6142	2,9963	2,9546
15 18	5,2051	5,1850	5,8733	5,8533
18 19	2,1657	2,1422	2,4500	2,4266
19 20	-7,6585	-7,6447	-6,7699	-6,7561
10 20	8,9616	8,9881	10,0433	10,0698
10 17	5,7967	5,8336	6,6058	6,6427
10 21	14,9558	14,8834	16,9722	16,8999
10 22	7,2644	7,2195	8,2026	8,1577
21 22	-1,8760	-1,8691	-1,4995	-1,4926
15 23	4,2745	4,2048	4,8458	4,7761
22 24	5,6802	5,5921	6,3537	6,2656
23 24	1,2174	1,1682	1,4289	1,3796
24 25	-1,5826	-1,5997	-1,3610	-1,3781
25 26	3,3214	3,2663	3,8227	3,7676
25 27	-5,3535	-5,3986	-4,6721	-4,7173
28 27	16,9532	17,3861	19,2997	19,7327
27 29	5,8373	5,8290	6,5498	6,5415
27 30	6,6904	6,6900	7,4926	7,4922
29 30	3,5075	3,5065	3,9006	3,8996
8 28	-0,7069	-0,6108	-0,4828	-0,3867
6 28	17,5761	17,9101	19,9914	20,3254

Tabela E.4: Potência reativa gerada para o FCNT - sistema completo

Barra	Potência reativa gerada (MW)			
	P_1	P_2	P_3	P_4
1	-20,5594	-19,6254	-14,9556	-14,0216
2	42,1282	40,2976	31,1444	29,3138
5	20,8608	19,7224	14,0307	12,8924
8	5,2894	3,8545	-3,3198	-4,7547
11	16,8269	16,4569	14,6067	14,2367
13	13,1321	12,5536	9,6612	9,0827

E Resultados completos para o IEEE30 utilizando o FCNT

Tabela E.6: Fluxo de potência reativa para o FCNT - sistema completo

Barra	Fluxo de potência reativa (MW)			
	P_1	P_2	P_3	P_4
1 2	-25,8102	-24,7694	-19,5650	-18,5242
1 3	4,5026	4,6095	5,1439	5,2508
2 4	2,0318	2,1434	2,7012	2,8127
3 4	-4,8959	-4,4618	-2,2917	-1,8577
2 5	1,2185	1,3554	2,0400	2,1769
2 6	-1,2051	-1,1767	-1,0350	-1,0066
4 6	-19,5635	-18,8400	-15,2222	-14,4987
5 7	8,7076	9,1837	11,5644	12,0405
6 7	-2,5558	-2,3314	-1,2092	-0,9848
6 8	-7,4474	-6,2663	-0,3611	0,8199
6 9	-7,8896	-7,7232	-6,8911	-6,7247
6 10	-0,1507	0,0062	0,7904	0,9473
9 11	-16,3268	-15,9772	-14,2292	-13,8795
9 10	4,3773	4,8321	7,1061	7,5609
4 12	13,1923	13,3344	14,0447	14,1868
12 13	-12,9266	-12,3638	-9,5498	-8,9870
12 14	2,2261	2,2811	2,5563	2,6114
12 15	6,1185	6,2916	7,1572	7,3303
12 16	2,7396	2,8371	3,3245	3,4220
14 15	0,5841	0,6090	0,7333	0,7581
16 17	0,9853	1,0444	1,3399	1,3990
15 18	1,4524	1,4972	1,7208	1,7656
18 19	0,5418	0,5703	0,7131	0,7416
19 20	-2,8231	-2,8066	-2,7239	-2,7073
10 20	3,8639	3,8179	3,8179	3,8639
10 17	4,7926	4,7579	4,7579	4,7926
10 21	10,5210	10,3590	10,3590	10,5210
10 22	4,8246	4,7494	4,7494	4,8246
21 22	-1,5182	-1,5094	-1,4655	-1,4567
15 23	2,6261	2,7011	3,0760	3,1510
22 24	2,8008	2,8472	3,0789	3,1253
23 24	1,0751	1,1207	1,3483	1,3938
24 25	1,8552	1,8716	1,8716	1,8552
25 26	2,2860	2,3090	2,4239	2,4468
25 27	-0,6398	-0,5919	-0,3523	-0,3044
28 27	4,4901	4,7111	5,8162	6,0373
27 29	1,5617	1,5920	1,7434	1,7737
27 30	1,5462	1,5791	1,7438	1,7767
29 30	0,5636	0,5756	0,6354	0,6474
8 28	-3,3215	-3,0833	-1,8921	-1,6538
6 28	-9,7745	-9,7549	-9,6568	-9,6372

Tabela E.7: Perdas ativas na transmissão para o FCNT - sistema completo

Barra	Perdas ativas (MW)			
	P_1	P_2	P_3	P_4
1 2	5,376616	5,402954	5,534648	5,560986
1 3	2,680943	2,715220	2,886604	2,920881
2 4	1,038537	1,055084	1,137815	1,154361
3 4	0,742207	0,749777	0,787631	0,795202
2 5	2,876666	2,912040	3,088911	3,124285
2 6	1,977335	2,000977	2,119192	2,142835
4 6	0,599840	0,607838	0,647827	0,655825
5 7	0,085359	0,103505	0,194234	0,212379
6 7	0,316563	0,330602	0,400794	0,414832
6 8	0,088964	0,093050	0,113476	0,117561
6 9	-0,049925	-0,035661	0,035661	0,049925
6 10	-0,074840	-0,053457	0,053457	0,074840
9 11	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
9 10	-0,025211	-0,018008	0,018008	0,025211
4 12	-0,087260	-0,062329	0,062329	0,087260
12 13	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
12 14	0,054299	0,059070	0,082927	0,087699
12 15	0,177566	0,183931	0,215757	0,222122
12 16	0,018322	0,025129	0,059165	0,065972
14 15	-0,011568	-0,006894	0,016474	0,021148
16 17	-0,015488	-0,009060	0,023079	0,029507
15 18	0,008936	0,015825	0,050272	0,057161
18 19	-0,010569	-0,006568	0,013434	0,017435
19 20	0,010894	0,013277	0,025193	0,027576
10 20	0,063158	0,070579	0,107687	0,115109
10 17	0,005215	0,008840	0,026969	0,030594
10 21	0,100386	0,103742	0,120522	0,123878
10 22	0,041414	0,044810	0,061790	0,065186
21 22	-0,002637	-0,001727	0,002823	0,003733
15 23	0,002574	0,009487	0,044053	0,050966
22 24	0,019338	0,027462	0,068082	0,076206
23 24	-0,027577	-0,018552	0,026576	0,035602
24 25	-0,037088	-0,023480	0,044564	0,058173
25 26	0,030245	0,034309	0,054631	0,058695
25 27	-0,002397	0,005975	0,047836	0,056208
28 27	-0,064638	-0,046170	0,046170	0,064638
27 29	0,064361	0,070497	0,101176	0,107312
27 30	0,125624	0,135855	0,187009	0,197240
29 30	0,013845	0,019428	0,047342	0,052925
8 28	-0,012378	-0,008772	0,009260	0,012867
6 28	0,050932	0,053741	0,067787	0,070596

Tabela E.8: Magnitudes das tensões para o FCNT - sistema parcial

Barra	Magnitudes das Tensões (p.u.)			
	P_1	P_2	P_3	P_4
1	1,0600	1,0600	1,0600	1,0600
2	1,0430	1,0430	1,0430	1,0430
3	1,0238	1,0233	1,0206	1,0201
4	1,0154	1,0148	1,0120	1,0114
5	1,0100	1,0100	1,0100	1,0100
6	1,0138	1,0133	1,0112	1,0107
7	1,0051	1,0047	1,0025	1,0020
8	1,0100	1,0100	1,0100	1,0100
9	1,0546	1,0539	1,0504	1,0497
10	1,0504	1,0493	1,0434	1,0422
11	1,0820	1,0820	1,0820	1,0820
12	1,0591	1,0584	1,0546	1,0538
13	1,0710	1,0710	1,0710	1,0710
14	1,0457	1,0446	1,0391	1,0380
15	1,0419	1,0407	1,0346	1,0333
16	1,0488	1,0478	1,0423	1,0413
17	1,0450	1,0438	1,0375	1,0363
18	1,0337	1,0322	1,0249	1,0234
19	1,0317	1,0302	1,0225	1,0209
20	1,0357	1,0342	1,0269	1,0254
21	1,0390	1,0376	1,0304	1,0289
22	1,0395	1,0381	1,0309	1,0295
23	1,0329	1,0314	1,0239	1,0224
24	1,0287	1,0270	1,0185	1,0168
25	1,0248	1,0232	1,0155	1,0139
26	1,0085	1,0066	0,9968	0,9949
27	1,0303	1,0290	1,0225	1,0212
28	1,0127	1,0122	1,0097	1,0092
29	1,0120	1,0103	1,0016	0,9999
30	1,0015	0,9995	0,9896	0,9876

Tabela E.9: Ângulos para o FCNT - sistema parcial

Barra	Ângulos (graus)			
	P_1	P_2	P_3	P_4
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	-4,9895	-5,1352	-5,8640	-6,0097
3	-7,3340	-7,5237	-8,4720	-8,6616
4	-8,8473	-9,0777	-10,2294	-10,4598
5	-13,2043	-13,5437	-15,2406	-15,5800
6	-10,4732	-10,7444	-12,1004	-12,3716
7	-12,0743	-12,3869	-13,9497	-14,2623
8	-11,1166	-11,4083	-12,8663	-13,1579
9	-13,5581	-13,8996	-15,6071	-15,9486
10	-15,1007	-15,4774	-17,3612	-17,7379
11	-13,5581	-13,8996	-15,6071	-15,9486
12	-14,5992	-14,9652	-16,7954	-17,1615
13	-14,5992	-14,9652	-16,7954	-17,1615
14	-15,3881	-15,7756	-17,7133	-18,1008
15	-15,4533	-15,8415	-17,7821	-18,1703
16	-15,0615	-15,4393	-17,3282	-17,7060
17	-15,2741	-15,6575	-17,5749	-17,9584
18	-15,9567	-16,3598	-18,3756	-18,7787
19	-16,0824	-16,4893	-18,5237	-18,9305
20	-15,8915	-16,2916	-18,2922	-18,6923
21	-15,4976	-15,8890	-17,8463	-18,2378
22	-15,4887	-15,8793	-17,8320	-18,2225
23	-15,7516	-16,1505	-18,1450	-18,5439
24	-15,8374	-16,2410	-18,2591	-18,6627
25	-15,4009	-15,7961	-17,7721	-18,1673
26	-15,7422	-16,1593	-18,2448	-18,6619
27	-14,9068	-15,2867	-17,1863	-17,5662
28	-11,0859	-11,3719	-12,8017	-13,0876
29	-16,0144	-16,4275	-18,4931	-18,9063
30	-16,8153	-17,2505	-19,4267	-19,8619

Tabela E.10: Potência ativa gerada para o FCNT - sistema parcial

Barra	Potência ativa gerada (MW)			
	P_1	P_2	P_3	P_4
1	283,4740	277,0519	244,9415	238,5194

Tabela E.12: Fluxo de potência ativa para o FCNT - sistema parcial

Barra	Fluxo de potência ativa (MW)			
	P_1	P_2	P_3	P_4
1 2	162,0394	166,5604	189,1654	193,6863
1 3	76,5831	78,3811	87,8865	89,6845
2 4	42,6311	43,2609	47,7998	48,4295
3 4	72,0882	73,6753	82,1904	83,7775
2 5	76,9698	78,7110	87,4169	89,1581
2 6	57,8413	58,9285	65,2711	66,3583
4 6	66,2445	68,0160	75,4252	77,1967
5 7	-15,3623	-14,6659	-13,6071	-12,9107
6 7	34,7015	35,4803	39,4219	40,2007
6 8	26,8276	28,2652	30,8476	32,2852
6 9	27,0345	27,6428	30,5495	31,1578
6 10	14,9399	15,2936	16,8627	17,2163
9 11	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
9 10	27,0812	27,6890	30,5033	31,1111
4 12	39,2302	40,1190	44,4359	45,3247
12 13	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
12 14	7,2207	7,2092	8,0910	8,0795
12 15	16,2414	16,1147	18,0453	17,9186
12 16	6,0471	5,9683	6,7265	6,6476
14 15	1,3765	1,3000	1,4583	1,3817
16 17	2,6559	2,6142	2,9963	2,9546
15 18	5,2051	5,1850	5,8733	5,8533
18 19	2,1657	2,1422	2,4500	2,4266
19 20	-7,6585	-7,6447	-6,7699	-6,7561
10 20	8,9616	8,9881	10,0433	10,0698
10 17	5,7967	5,8336	6,6058	6,6427
10 21	14,9558	14,8834	16,9722	16,8999
10 22	7,2644	7,2195	8,2026	8,1577
21 22	-1,8760	-1,8691	-1,4995	-1,4926
15 23	4,2745	4,2048	4,8458	4,7761
22 24	5,6802	5,5921	6,3537	6,2656
23 24	1,2174	1,1682	1,4289	1,3796
24 25	-1,5826	-1,5997	-1,3610	-1,3781
25 26	3,3214	3,2663	3,8227	3,7676
25 27	-5,3535	-5,3986	-4,6721	-4,7173
28 27	16,9532	17,3861	19,2997	19,7327
27 29	5,8373	5,8290	6,5498	6,5415
27 30	6,6904	6,6900	7,4926	7,4922
29 30	3,5075	3,5065	3,9006	3,8996
8 28	-0,7069	-0,6108	-0,4828	-0,3867
6 28	17,5761	17,9101	19,9914	20,3254

Tabela E.11: Potência reativa gerada para o FCNT - sistema parcial

Barra	Potência reativa gerada (MW)			
	P_1	P_2	P_3	P_4
1	-20,5594	-19,6254	-14,9556	-14,0216
2	42,1282	40,2976	31,1444	29,3138
5	20,8608	19,7224	14,0307	12,8924
8	5,2894	3,8545	-3,3198	-4,7547
11	16,8269	16,4569	14,6067	14,2367
13	13,1321	12,5536	9,6612	9,0827

Tabela E.13: Fluxo de potência reativa para o FCNT - sistema parcial

Barra	Fluxo de potência reativa (MW)			
	P_1	P_2	P_3	P_4
1 2	-25,8102	-24,7694	-19,5650	-18,5242
1 3	4,5026	4,6095	5,1439	5,2508
2 4	2,0318	2,1434	2,7012	2,8127
3 4	-4,8959	-4,4618	-2,2917	-1,8577
2 5	1,2185	1,3554	2,0400	2,1769
2 6	-1,2051	-1,1767	-1,0350	-1,0066
4 6	-19,5635	-18,8400	-15,2222	-14,4987
5 7	8,7076	9,1837	11,5644	12,0405
6 7	-2,5558	-2,3314	-1,2092	-0,9848
6 8	-7,4474	-6,2663	-0,3611	0,8199
6 9	-7,8896	-7,7232	-6,8911	-6,7247
6 10	-0,1507	0,0062	0,7904	0,9473
9 11	-16,3268	-15,9772	-14,2292	-13,8795
9 10	4,3773	4,8321	7,1061	7,5609
4 12	13,1923	13,3344	14,0447	14,1868
12 13	-12,9266	-12,3638	-9,5498	-8,9870
12 14	2,2261	2,2811	2,5563	2,6114
12 15	6,1185	6,2916	7,1572	7,3303
12 16	2,7396	2,8371	3,3245	3,4220
14 15	0,5841	0,6090	0,7333	0,7581
16 17	0,9853	1,0444	1,3399	1,3990
15 18	1,4524	1,4972	1,7208	1,7656
18 19	0,5418	0,5703	0,7131	0,7416
19 20	-2,8231	-2,8066	-2,7239	-2,7073
10 20	3,8639	3,8179	3,8179	3,8639
10 17	4,7926	4,7579	4,7579	4,7926
10 21	10,5210	10,3590	10,3590	10,5210
10 22	4,8246	4,7494	4,7494	4,8246
21 22	-1,5182	-1,5094	-1,4655	-1,4567
15 23	2,6261	2,7011	3,0760	3,1510
22 24	2,8008	2,8472	3,0789	3,1253
23 24	1,0751	1,1207	1,3483	1,3938
24 25	1,8552	1,8716	1,8716	1,8552
25 26	2,2860	2,3090	2,4239	2,4468
25 27	-0,6398	-0,5919	-0,3523	-0,3044
28 27	4,4901	4,7111	5,8162	6,0373
27 29	1,5617	1,5920	1,7434	1,7737
27 30	1,5462	1,5791	1,7438	1,7767
29 30	0,5636	0,5756	0,6354	0,6474
8 28	-3,3215	-3,0833	-1,8921	-1,6538
6 28	-9,7745	-9,7549	-9,6568	-9,6372

Tabela E.14: Perdas ativas na transmissão para o FCNT - sistema parcial

Barra	Perdas ativas (MW)			
	P_1	P_2	P_3	P_4
1 2	5,376616	5,402954	5,534648	5,560986
1 3	2,680943	2,715220	2,886604	2,920881
2 4	1,038537	1,055084	1,137815	1,154361
3 4	0,742207	0,749777	0,787631	0,795202
2 5	2,876666	2,912040	3,088911	3,124285
2 6	1,977335	2,000977	2,119192	2,142835
4 6	0,599840	0,607838	0,647827	0,655825
5 7	0,085359	0,103505	0,194234	0,212379
6 7	0,316563	0,330602	0,400794	0,414832
6 8	0,088964	0,093050	0,113476	0,117561
6 9	-0,049925	-0,035661	0,035661	0,049925
6 10	-0,074840	-0,053457	0,053457	0,074840
9 11	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
9 10	-0,025211	-0,018008	0,018008	0,025211
4 12	-0,087260	-0,062329	0,062329	0,087260
12 13	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
12 14	0,054299	0,059070	0,082927	0,087699
12 15	0,177566	0,183931	0,215757	0,222122
12 16	0,018322	0,025129	0,059165	0,065972
14 15	-0,011568	-0,006894	0,016474	0,021148
16 17	-0,015488	-0,009060	0,023079	0,029507
15 18	0,008936	0,015825	0,050272	0,057161
18 19	-0,010569	-0,006568	0,013434	0,017435
19 20	0,010894	0,013277	0,025193	0,027576
10 20	0,063158	0,070579	0,107687	0,115109
10 17	0,005215	0,008840	0,026969	0,030594
10 21	0,100386	0,103742	0,120522	0,123878
10 22	0,041414	0,044810	0,061790	0,065186
21 22	-0,002637	-0,001727	0,002823	0,003733
15 23	0,002574	0,009487	0,044053	0,050966
22 24	0,019338	0,027462	0,068082	0,076206
23 24	-0,027577	-0,018552	0,026576	0,035602
24 25	-0,037088	-0,023480	0,044564	0,058173
25 26	0,030245	0,034309	0,054631	0,058695
25 27	-0,002397	0,005975	0,047836	0,056208
28 27	-0,064638	-0,046170	0,046170	0,064638
27 29	0,064361	0,070497	0,101176	0,107312
27 30	0,125624	0,135855	0,187009	0,197240
29 30	0,013845	0,019428	0,047342	0,052925
8 28	-0,012378	-0,008772	0,009260	0,012867
6 28	0,050932	0,053741	0,067787	0,070596

Apêndice F

Resultados completos para o IEEE30 utilizando o FCNS

As tabelas que referem-se a simulação com todas as potências nas barras sendo nebulosas, estão referenciadas como sendo sistema completo (tabelas F.1 à F.7). E as tabelas para simulação com parte das barras do sistema tendo as potências constantes estão referenciadas como sendo sistema parcial (tabelas F.8 à F.14).

Tabela F.1: Ângulos e magnitudes das tensões para o FCNS - sistema completo

Barra	Ângulos (graus)		Tensões (p.u.)	
	m	α	m	α
1	0,0000	0,0000	1,0600	0,0000
2	-5,4996	0,2513	1,0430	0,0000
3	-7,9978	0,3657	1,0220	0,0012
4	-9,6536	0,4448	1,0134	0,0013
5	-14,3922	0,5997	1,0100	0,0000
6	-11,4224	0,5218	1,0122	0,0010
7	-13,1683	0,5800	1,0036	0,0011
8	-12,1373	0,5644	1,0100	0,0000
9	-14,7533	0,6992	1,0521	0,0017
10	-16,4193	0,7907	1,0463	0,0029
11	-14,7533	0,6992	1,0820	0,0000
12	-15,8803	0,7764	1,0565	0,0019
13	-15,8803	0,7764	1,0710	0,0000
14	-16,7444	0,8219	1,0418	0,0027
15	-16,8118	0,8223	1,0376	0,0030
16	-16,3838	0,7972	1,0450	0,0027
17	-16,6162	0,8041	1,0407	0,0031
18	-17,3677	0,8503	1,0286	0,0036
19	-17,5065	0,8562	1,0263	0,0038
20	-17,2919	0,8428	1,0306	0,0036
21	-16,8677	0,8152	1,0340	0,0035
22	-16,8556	0,8142	1,0345	0,0035
23	-17,1478	0,8354	1,0276	0,0037
24	-17,2501	0,8334	1,0227	0,0042
25	-16,7841	0,8162	1,0193	0,0038
26	-17,2021	0,8406	1,0017	0,0048
27	-16,2365	0,7903	1,0258	0,0031
28	-12,0868	0,5531	1,0109	0,0012
29	-17,4603	0,8604	1,0060	0,0043
30	-18,3386	0,9123	0,9945	0,0049

Tabela F.2: Ângulos e magnitudes das tensões para o FCNS - sistema completo

Barra	Ângulos (graus)		Tensões (p.u.)	
	$m - \alpha$	$m + \alpha$	$m - \alpha$	$m + \alpha$
1	0,0000	0,0000	1,0600	1,0600
2	-5,7509	-5,2483	1,0430	1,0430
3	-8,3635	-7,6322	1,0207	1,0232
4	-10,0984	-9,2087	1,0121	1,0148
5	-14,9919	-13,7925	1,0100	1,0100
6	-11,9442	-10,9006	1,0112	1,0133
7	-13,7483	-12,5883	1,0025	1,0046
8	-12,7017	-11,5728	1,0100	1,0100
9	-15,4526	-14,0541	1,0504	1,0539
10	-17,2100	-15,6286	1,0435	1,0492
11	-15,4526	-14,0541	1,0820	1,0820
12	-16,6567	-15,1039	1,0546	1,0583
13	-16,6567	-15,1039	1,0710	1,0710
14	-17,5663	-15,9226	1,0391	1,0446
15	-17,6341	-15,9895	1,0346	1,0406
16	-17,1809	-15,5866	1,0424	1,0477
17	-17,4203	-15,8121	1,0376	1,0437
18	-18,2180	-16,5174	1,0249	1,0322
19	-18,3626	-16,6503	1,0225	1,0301
20	-18,1347	-16,4491	1,0269	1,0342
21	-17,6828	-16,0525	1,0304	1,0375
22	-17,6699	-16,0414	1,0310	1,0380
23	-17,9832	-16,3124	1,0239	1,0314
24	-18,0834	-16,4167	1,0186	1,0269
25	-17,6002	-15,9679	1,0155	1,0232
26	-18,0427	-16,3614	0,9969	1,0065
27	-17,0268	-15,4462	1,0226	1,0289
28	-12,6399	-11,5337	1,0098	1,0121
29	-18,3207	-16,5999	1,0017	1,0102
30	-19,2509	-17,4263	0,9896	0,9994

Tabela F.3: Potência ativa gerada para o FCNS - sistema completo

Barra	Potência ativa gerada (MW)			
	m	α	$m - \alpha$	$m + \alpha$
1	261,0018	11,4684	249,5333	272,4702

Tabela F.5: Fluxo de potência ativa para o FCNS - sistema completo

Barra	Fluxo de potência ativa (MW)			
	m	α	$m - \alpha$	$m + \alpha$
1 2	177,8668	7,7959	170,0709	185,6627
1 3	83,135	3,5361	79,5989	86,6711
2 4	45,5311	1,7059	43,8252	47,237
3 4	77,9336	3,3014	74,6322	81,235
2 5	83,0647	3,1326	79,9321	86,1973
2 6	62,1012	2,4965	59,6047	64,5977
4 6	71,7211	2,9198	68,8013	74,6409
5 7	-14,1365	0,0771	-14,2136	-14,0594
6 7	37,4513	1,1309	36,3204	38,5822
6 8	29,5566	1,0485	28,5081	30,6051
6 9	29,096	1,6216	27,4744	30,7176
6 10	16,078	0,9204	15,1576	16,9984
9 11	0	0	0	0
9 10	29,0961	1,5647	27,5314	30,6608
4 12	42,2768	2,3664	39,9104	44,6432
12 13	0	0	0	0
12 14	7,6502	0,1411	7,5091	7,7913
12 15	17,0801	0,1664	16,9137	17,2465
12 16	6,3474	0,0006	6,3468	6,348
14 15	1,3791	0,072	1,3071	1,4511
16 17	2,8052	0,0238	2,7814	2,829
15 18	5,5292	0,0767	5,4525	5,6059
18 19	2,2961	0,0057	2,2904	2,3018
19 20	-7,2073	0,1647	-7,372	-7,0426
10 20	9,5158	0,2509	9,2649	9,7667
10 17	6,2197	0,1669	6,0528	6,3866
10 21	15,9279	0,1373	15,7906	16,0652
10 22	7,7111	0,0571	7,654	7,7682
21 22	-1,6843	0,0127	-1,697	-1,6716
15 23	4,5253	0,0449	4,4804	4,5702
22 24	5,9729	0,0358	5,9371	6,0087
23 24	1,2985	0,0585	1,24	1,357
24 25	-1,4803	0,0262	-1,5065	-1,4541
25 26	3,5445	0,0432	3,5013	3,5877
25 27	-5,0353	0,0313	-5,0666	-5,004
28 27	18,3428	1,1199	17,2229	19,4627
27 29	6,1895	0,1254	6,0641	6,3149
27 30	7,0914	0,165	6,9264	7,2564
29 30	3,7036	0,0962	3,6074	3,7998
8 28	-0,5468	0,0816	-0,6284	-0,4652
6 28	18,9508	0,8032	18,1476	19,754

Tabela F.4: Potência reativa gerada para o FCNS - sistema completo

Barra	Potência reativa gerada (MW)			
	m	α	$m - \alpha$	$m + \alpha$
1	-17,2619	2,8371	-20,0990	-14,4248
2	35,7560	4,4003	31,3557	40,1562
5	16,8854	1,1483	15,7371	18,0337
8	0,2680	3,3241	-3,0561	3,5921
11	15,5318	0,9077	14,6241	16,4395
13	11,1074	1,4294	9,6780	12,5368

Tabela F.6: Fluxo de potência reativa para o FCNS - sistema completo

Barra	Fluxo de potência reativa (MW)			
	m	α	$m - \alpha$	$m + \alpha$
1 2	-22,1501	1,7948	-23,9449	-20,3553
1 3	4,8882	0,3196	4,5686	5,2078
2 4	2,4255	0,2726	2,1529	2,6981
3 4	-3,3744	0,7675	-4,1419	-2,6069
2 5	1,7072	0,2463	1,4609	1,9535
2 6	-1,0997	0,0036	-1,1033	-1,0961
4 6	-17,029	0,0795	-17,1085	-16,9495
5 7	10,3741	0,7072	9,6669	11,0813
6 7	-1,7697	0,277	-2,0467	-1,4927
6 8	-3,3131	2,7587	-6,0718	-0,5544
6 9	-7,3048	0,422	-7,7268	-6,8828
6 10	0,4003	0,3909	0,0094	0,7912
9 11	-15,1032	0,8561	-15,9593	-14,2471
9 10	5,9704	1,0348	4,9356	7,0052
4 12	13,6961	0,3772	13,3189	14,0733
12 13	-10,9568	1,3882	-12,345	-9,5686
12 14	2,4188	0,1666	2,2522	2,5854
12 15	6,7246	0,4977	6,2269	7,2223
12 16	3,0808	0,2768	2,804	3,3576
14 15	0,6711	0,0648	0,6063	0,7359
16 17	1,1922	0,1686	1,0236	1,3608
15 18	1,609	0,1429	1,4661	1,7519
18 19	0,6417	0,0763	0,5654	0,718
19 20	-2,7652	0,0717	-2,8369	-2,6935
10 20	3,7029	0,1547	3,5482	3,8576
10 17	4,6709	0,135	4,5359	4,8059
10 21	9,954	0,5649	9,3891	10,5189
10 22	4,5615	0,2623	4,2992	4,8238
21 22	-1,4874	0,0203	-1,5077	-1,4671
15 23	2,8885	0,2438	2,6447	3,1323
22 24	2,9631	0,1896	2,7735	3,1527
23 24	1,2345	0,1379	1,0966	1,3724
24 25	1,9127	0,03	1,8827	1,9427
25 26	2,3664	0,134	2,2324	2,5004
25 27	-0,4721	0,1717	-0,6438	-0,3004
28 27	5,2658	0,5416	4,7242	5,8074
27 29	1,6678	0,1033	1,5645	1,7711
27 30	1,6617	0,1071	1,5546	1,7688
29 30	0,6056	0,0332	0,5724	0,6388
8 28	-2,4877	0,5145	-3,0022	-1,9732
6 28	-9,7056	0,0001	-9,7057	-9,7055

Tabela F.7: Perdas ativas na transmissão para o FCNS - sistema completo

Barra	Perdas ativas (MW)			
	m	α	$m - \alpha$	$m + \alpha$
1 2	5,479864	0,485658	4,994206	5,965522
1 3	2,806347	0,247675	2,558672	3,054022
2 4	1,0985	0,100739	0,997761	1,199239
3 4	0,770323	0,067428	0,702895	0,837751
2 5	3,004846	0,224949	2,779897	3,229795
2 6	2,064031	0,182243	1,881788	2,246274
4 6	0,62902	0,052559	0,576461	0,681579
5 7	0,148905	0,008697	0,140208	0,157602
6 7	0,366074	0,022077	0,343997	0,388151
6 8	0,103619	0,009576	0,094043	0,113195
6 9	0	0	0	0
6 10	0	0	0	0
9 11	0	0	0	0
9 10	0	0	0	0
4 12	0	0	0	0
12 13	0	0	0	0
12 14	0,071104	0,007789	0,063315	0,078893
12 15	0,200062	0,022192	0,17787	0,222254
12 16	0,042175	0,004987	0,037188	0,047162
14 15	0,00479	0,000631	0,004159	0,005421
16 17	0,007013	0,000917	0,006096	0,00793
15 18	0,033094	0,003752	0,029342	0,036846
18 19	0,003437	0,000417	0,00302	0,003854
19 20	0,019269	0,001987	0,017282	0,021256
10 20	0,089292	0,009315	0,079977	0,098607
10 17	0,017928	0,001657	0,016271	0,019585
10 21	0,112232	0,012211	0,100021	0,124443
10 22	0,053348	0,005806	0,047542	0,059154
21 22	0,000548	0,000057	0,000491	0,000605
15 23	0,026781	0,00333	0,023451	0,030111
22 24	0,047802	0,005203	0,042599	0,053005
23 24	0,004013	0,000733	0,00328	0,004746
24 25	0,010555	0,000297	0,010258	0,010852
25 26	0,044493	0,00498	0,039513	0,049473
25 27	0,026947	0,003476	0,023471	0,030423
28 27	0	0	0	0
27 29	0,08599	0,00948	0,07651	0,09547
27 30	0,16175	0,017831	0,143919	0,179581
29 30	0,03346	0,003686	0,029774	0,037146
8 28	0,00025	0,00007	0,00018	0,00032
6 28	0,060897	0,005691	0,055206	0,066588

Tabela F.8: Ângulos e Magnitudes das tensões para o FCNS - sistema parcial

Barra	Ângulos (graus)		Tensões (p.u.)	
	m	α	m	α
1	0,0000	0,0000	1,0600	0,0000
2	-5,4996	0,1001	1,0430	0,0000
3	-7,9978	0,1587	1,0220	0,0007
4	-9,6536	0,1941	1,0134	0,0008
5	-14,3922	0,1675	1,0100	0,0000
6	-11,4224	0,2240	1,0122	0,0006
7	-13,1683	0,2012	1,0036	0,0004
8	-12,1373	0,2397	1,0100	0,0000
9	-14,7533	0,3690	1,0521	0,0014
10	-16,4193	0,4441	1,0463	0,0023
11	-14,7533	0,3690	1,0820	0,0000
12	-15,8803	0,4162	1,0565	0,0012
13	-15,8803	0,4162	1,0710	0,0000
14	-16,7444	0,4437	1,0418	0,0017
15	-16,8118	0,4589	1,0376	0,0023
16	-16,3838	0,4422	1,0450	0,0021
17	-16,6162	0,4547	1,0407	0,0025
18	-17,3677	0,4919	1,0286	0,0030
19	-17,5065	0,5011	1,0263	0,0032
20	-17,2919	0,4898	1,0306	0,0030
21	-16,8677	0,4682	1,0340	0,0030
22	-16,8556	0,4674	1,0345	0,0030
23	-17,1478	0,4789	1,0276	0,0031
24	-17,2501	0,4867	1,0227	0,0036
25	-16,7841	0,4828	1,0193	0,0034
26	-17,2021	0,5069	1,0017	0,0044
27	-16,2365	0,4655	1,0258	0,0028
28	-12,0868	0,2472	1,0109	0,0009
29	-17,4603	0,5347	1,0060	0,0039
30	-18,3386	0,5859	0,9945	0,0045

Tabela F.9: Ângulos e magnitudes das tensões para o FCNS - sistema parcial

Barra	Ângulos (graus)		Tensões (p.u.)	
	$m - \alpha$	$m + \alpha$	$m - \alpha$	$m + \alpha$
1	0,0000	0,0000	1,0600	1,0600
2	-5,5997	-5,3995	1,0430	1,0430
3	-8,1566	-7,8391	1,0213	1,0226
4	-9,8477	-9,4594	1,0126	1,0142
5	-14,5597	-14,2246	1,0100	1,0100
6	-11,6463	-11,1984	1,0116	1,0129
7	-13,3695	-12,9671	1,0032	1,0039
8	-12,3770	-11,8976	1,0100	1,0100
9	-15,1223	-14,3844	1,0508	1,0535
10	-16,8634	-15,9752	1,0440	1,0487
11	-15,1223	-14,3844	1,0820	1,0820
12	-16,2966	-15,4641	1,0553	1,0577
13	-16,2966	-15,4641	1,0710	1,0710
14	-17,1882	-16,3007	1,0402	1,0435
15	-17,2707	-16,3529	1,0353	1,0399
16	-16,8260	-15,9415	1,0430	1,0471
17	-17,0709	-16,1615	1,0381	1,0432
18	-17,8596	-16,8758	1,0256	1,0315
19	-18,0075	-17,0054	1,0231	1,0295
20	-17,7817	-16,8021	1,0275	1,0336
21	-17,3359	-16,3994	1,0309	1,0370
22	-17,3230	-16,3882	1,0315	1,0375
23	-17,6267	-16,6689	1,0246	1,0307
24	-17,7368	-16,7634	1,0191	1,0264
25	-17,2669	-16,3013	1,0159	1,0227
26	-17,7090	-16,6952	0,9973	1,0061
27	-16,7020	-15,7710	1,0230	1,0285
28	-12,3340	-11,8396	1,0101	1,0118
29	-17,9950	-16,9256	1,0021	1,0099
30	-18,9245	-17,7527	0,9900	0,9991

Tabela F.10: Potência ativa gerada para o FCNS - sistema parcial

Barra	Potência ativa gerada (MW)			
	m	α	$m - \alpha$	$m + \alpha$
1	260,9975	4,7086	256,2889	265,7062

Tabela F.12: Fluxo de potência ativa para o FCNS - sistema parcial

Barra	Fluxo de potência ativa (MW)			
	m	α	$m - \alpha$	$m + \alpha$
1 2	177,8635	3,1056	174,7579	180,9691
1 3	83,134	1,5281	81,6059	84,6621
2 4	45,5305	0,8133	44,7172	46,3438
3 4	77,933	1,4423	76,4907	79,3753
2 5	83,064	0,6062	82,4578	83,6702
2 6	62,1001	1,1226	60,9775	63,2227
4 6	71,7207	1,1288	70,5919	72,8495
5 7	-14,1365	0,325	-14,4615	-13,8115
6 7	37,4511	0,3652	37,0859	37,8163
6 8	29,5565	0,2272	29,3293	29,7837
6 9	29,096	1,3196	27,7764	30,4156
6 10	16,078	0,751	15,327	16,829
9 11	0	0	0	0
9 10	29,0961	1,2838	27,8123	30,3799
4 12	42,2771	1,5788	40,6983	43,8559
12 13	0	0	0	0
12 14	7,6501	0,0906	7,5595	7,7407
12 15	17,0801	0,1425	16,9376	17,2226
12 16	6,3474	0,0288	6,3186	6,3762
14 15	1,3791	0,0988	1,2803	1,4779
16 17	2,8052	0,0085	2,7967	2,8137
15 18	5,5292	0,1016	5,4276	5,6308
18 19	2,2961	0,0321	2,264	2,3282
19 20	-7,2073	0,1354	-7,3427	-7,0719
10 20	9,5158	0,216	9,2998	9,7318
10 17	6,2197	0,1253	6,0944	6,345
10 21	15,9279	0,1388	15,7891	16,0667
10 22	7,7111	0,0587	7,6524	7,7698
21 22	-1,6843	0,0082	-1,6925	-1,6761
15 23	4,5253	0,007	4,5183	4,5323
22 24	5,9729	0,0291	5,9438	6,002
23 24	1,2985	0,0412	1,2573	1,3397
24 25	-1,4804	0,0095	-1,4899	-1,4709
25 26	3,5445	0,0433	3,5012	3,5878
25 27	-5,0354	0,0065	-5,0419	-5,0289
28 27	18,3428	1,0254	17,3174	19,3682
27 29	6,1894	0,1238	6,0656	6,3132
27 30	7,0914	0,163	6,9284	7,2544
29 30	3,7036	0,095	3,6086	3,7986
8 28	-0,5468	0,0667	-0,6135	-0,4801
6 28	18,9508	0,5492	18,4016	19,5

Tabela F.11: Potência reativa gerada para o FCNS - sistema parcial

Barra	Potência reativa gerada (MW)			
	m	α	$m - \alpha$	$m + \alpha$
1	-17,2856	1,2457	-18,5313	-16,0399
2	35,7260	2,0370	33,6889	37,7630
5	16,8770	0,5048	16,3722	17,3818
8	0,2675	2,0217	-1,7542	2,2891
11	15,5318	0,7157	14,8160	16,2475
13	11,1074	0,9094	10,1980	12,0168

Tabela F.13: Fluxo de potência reativa para o FCNS - sistema parcial

Barra	Fluxo de potência reativa (MW)			
	m	α	$m - \alpha$	$m + \alpha$
1 2	-22,1645	0,715	-22,8795	-21,4495
1 3	4,8789	0,217	4,6619	5,0959
2 4	2,423	0,1973	2,2257	2,6203
3 4	-3,3763	0,2345	-3,6108	-3,1418
2 5	1,6981	0,0477	1,6504	1,7458
2 6	-1,1046	0,0931	-1,1977	-1,0115
4 6	-17,0308	0,0241	-17,0549	-17,0067
5 7	10,3742	0,124	10,2502	10,4982
6 7	-1,7702	0,1525	-1,9227	-1,6177
6 8	-3,3137	1,6087	-4,9224	-1,705
6 9	-7,3056	0,4165	-7,7221	-6,8891
6 10	0,3997	0,3561	0,0436	0,7558
9 11	-15,1032	0,6753	-15,7785	-14,4279
9 10	5,9699	0,8949	5,075	6,8648
4 12	13,6925	0,2835	13,409	13,976
12 13	-10,9568	0,8837	-11,8405	-10,0731
12 14	2,4188	0,0897	2,3291	2,5085
12 15	6,7246	0,4896	6,235	7,2142
12 16	3,0808	0,2847	2,7961	3,3655
14 15	0,6711	0,0767	0,5944	0,7478
16 17	1,1922	0,1783	1,0139	1,3705
15 18	1,6091	0,1498	1,4593	1,7589
18 19	0,6417	0,0859	0,5558	0,7276
19 20	-2,7652	0,0732	-2,8384	-2,692
10 20	3,7029	0,1458	3,5571	3,8487
10 17	4,6709	0,1275	4,5434	4,7984
10 21	9,954	0,5556	9,3984	10,5096
10 22	4,5615	0,2572	4,3043	4,8187
21 22	-1,4874	0,0075	-1,4949	-1,4799
15 23	2,8886	0,2464	2,6422	3,135
22 24	2,9631	0,1806	2,7825	3,1437
23 24	1,2345	0,1521	1,0824	1,3866
24 25	1,9127	0,0351	1,8776	1,9478
25 26	2,3664	0,1331	2,2333	2,4995
25 27	-0,4721	0,1737	-0,6458	-0,2984
28 27	5,2655	0,5299	4,7356	5,7954
27 29	1,6678	0,1028	1,565	1,7706
27 30	1,6617	0,1063	1,5554	1,768
29 30	0,6056	0,0337	0,5719	0,6393
8 28	-2,4877	0,3797	-2,8674	-2,108
6 28	-9,7057	0,1753	-9,881	-9,5304

Tabela F.14: Perdas ativas na transmissão para o FCNS - sistema parcial

Barra	Perdas ativas (MW)			
	m	α	$m - \alpha$	$m + \alpha$
1 2	5,470557	0,193472	5,277085	5,664029
1 3	2,801936	0,108526	2,69341	2,910462
2 4	1,096934	0,049996	1,046938	1,14693
3 4	0,769028	0,030605	0,738423	0,799633
2 5	3,000639	0,04353	2,957109	3,044169
2 6	2,060912	0,084923	1,975989	2,145835
4 6	0,62801	0,020041	0,607969	0,648051
5 7	0,148973	0,008993	0,13998	0,157966
6 7	0,365755	0,006873	0,358882	0,372628
6 8	0,103312	0,002785	0,100527	0,106097
6 9	0	0	0	0
6 10	0	0	0	0
9 11	0	0	0	0
9 10	0	0	0	0
4 12	0	0	0	0
12 13	0	0	0	0
12 14	0,071037	0,004521	0,066516	0,075558
12 15	0,200032	0,021281	0,178751	0,221313
12 16	0,042191	0,00567	0,036521	0,047861
14 15	0,004809	0,001586	0,003223	0,006395
16 17	0,007019	0,001192	0,005827	0,008211
15 18	0,033112	0,004318	0,028794	0,03743
18 19	0,003441	0,000565	0,002876	0,004006
19 20	0,019259	0,001713	0,017546	0,020972
10 20	0,089255	0,008308	0,080947	0,097563
10 17	0,017919	0,001387	0,016532	0,019306
10 21	0,11223	0,012063	0,100167	0,124293
10 22	0,053346	0,005731	0,047615	0,059077
21 22	0,000548	0,000058	0,00049	0,000606
15 23	0,026796	0,003914	0,022882	0,03071
22 24	0,047803	0,005103	0,0427	0,052906
23 24	0,004015	0,000933	0,003082	0,004948
24 25	0,010543	0,000107	0,010436	0,01065
25 26	0,044492	0,00494	0,039552	0,049432
25 27	0,026924	0,002696	0,024228	0,02962
28 27	0	0	0	0
27 29	0,085986	0,009419	0,076567	0,095405
27 30	0,161742	0,017717	0,144025	0,179459
29 30	0,033458	0,003663	0,029795	0,037121
8 28	0,000247	0,000095	0,000152	0,000342
6 28	0,060837	0,004375	0,056462	0,065212

Apêndice G

Resultados completos para o IEEE30 utilizando o FCNS discreto

Neste apêndice estão colocadas as tabelas referente à simulação para o FCNSdis, não estão colocados os resultados para o ângulos e as magnitudes das tensões, já que estes são idênticos aos calculados para o FCNS com o sistema completo

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

Tabela G.1: Potência ativa gerada para o FCNSdis

Barra	Potência ativa gerada (MW)			
	m	α	$m - \alpha$	$m + \alpha$
1	260,9967	11,4728	249,5239	272,4695

Tabela G.2: Potência reativa gerada para o FCNSdis

Barra	Potência reativa gerada (MW)			
	m	α	$m - \alpha$	$m + \alpha$
1	-17,2905	1,4748	-18,7653	-15,8157
2	35,7210	3,2720	32,4490	38,9930
5	16,8766	2,1046	14,7720	18,9811
8	0,2674	3,3665	-3,0992	3,6339
11	15,5318	0,9077	14,6241	16,4395
13	11,1074	1,4294	9,6780	12,5368

Tabela G.3: Fluxo de potência ativa para o FCNSdis

Barra	Fluxo de potência ativa (MW)			
	m	α	$m - \alpha$	$m + \alpha$
1 2	177,8629	7,7959	170,067	185,6588
1 3	83,1338	3,6769	79,4569	86,8107
2 4	45,5303	2,0808	43,4495	47,6111
3 4	77,9328	3,3085	74,6243	81,2413
2 5	83,0639	3,1326	79,9313	86,1965
2 6	62,0998	2,7475	59,3523	64,8473
4 6	71,7206	2,7303	68,9903	74,4509
5 7	-14,1365	0,0818	-14,2183	-14,0547
6 7	37,4511	1,0886	36,3625	38,5397
6 8	29,5564	0,9904	28,566	30,5468
6 9	29,0961	1,4698	27,6263	30,5659
6 10	16,0781	0,8025	15,2756	16,8806
9 11	0	0	0	0
9 10	29,0961	1,4698	27,6263	30,5659
4 12	42,2775	2,1114	40,1661	44,3889
12 13	0	0	0	0
12 14	7,6501	0,3902	7,2599	8,0403
12 15	17,08	0,8535	16,2265	17,9335
12 16	6,3474	0,3083	6,0391	6,6557
14 15	1,3791	0,0726	1,3065	1,4517
16 17	2,8052	0,1284	2,6768	2,9336
15 18	5,5292	0,277	5,2522	5,8062
18 19	2,2961	0,1134	2,1827	2,4095
19 20	-7,2073	0,362	-7,5693	-6,8453
10 20	9,5157	0,4832	9,0325	9,9989
10 17	6,2197	0,324	5,8957	6,5437
10 21	15,9278	0,7928	15,135	16,7206
10 22	7,7111	0,3824	7,3287	8,0935
21 22	-1,6843	0,0941	-1,7784	-1,5902
15 23	4,5253	0,2166	4,3087	4,7419
22 24	5,9729	0,2825	5,6904	6,2554
23 24	1,2985	0,0534	1,2451	1,3519
24 25	-1,4804	0,1048	-1,5852	-1,3756
25 26	3,5445	0,1798	3,3647	3,7243
25 27	-5,0354	0,2849	-5,3203	-4,7505
28 27	18,3429	0,9688	17,3741	19,3117
27 29	6,1894	0,3167	5,8727	6,5061
27 30	7,0913	0,3638	6,7275	7,4551
29 30	3,7035	0,1874	3,5161	3,8909
8 28	-0,5468	0,0818	-0,6286	-0,465
6 28	18,9507	0,8925	18,0582	19,8432

Tabela G.4: Fluxo de potência reativa para o FCNSdis

Barra	Fluxo de potência reativa (MW)			
	m	α	$m - \alpha$	$m + \alpha$
1 2	-22,1672	1,7948	-23,962	-20,3724
1 3	4,8767	0,32	4,5567	5,1967
2 4	2,4223	0,2732	2,1491	2,6955
3 4	-3,3768	0,7592	-4,136	-2,6176
2 5	1,6977	0,2463	1,4514	1,944
2 6	-1,1059	0,0068	-1,1127	-1,0991
4 6	-17,0311	1,4512	-18,4823	-15,5799
5 7	10,3741	0,9132	9,4609	11,2873
6 7	-1,7703	0,2733	-2,0436	-1,497
6 8	-3,3137	2,7616	-6,0753	-0,5521
6 9	-7,3072	0,4226	-7,7298	-6,8846
6 10	0,3983	0,3915	0,0068	0,7898
9 11	-15,1032	0,8576	-15,9608	-14,2456
9 10	5,9691	1,1153	4,8538	7,0844
4 12	13,6896	0,3782	13,3114	14,0678
12 13	-10,9568	1,3907	-12,3475	-9,5661
12 14	2,4187	0,1608	2,2579	2,5795
12 15	6,7244	0,4798	6,2446	7,2042
12 16	3,0808	0,2695	2,8113	3,3503
14 15	0,6711	0,0649	0,6062	0,736
16 17	1,1922	0,1693	1,0229	1,3615
15 18	1,609	0,141	1,468	1,75
18 19	0,6417	0,0885	0,5532	0,7302
19 20	-2,7652	0,0823	-2,8475	-2,6829
10 20	3,7027	0,1419	3,5608	3,8446
10 17	4,6709	0,127	4,5439	4,7979
10 21	9,9539	0,5307	9,4232	10,4846
10 22	4,5615	0,2472	4,3143	4,8087
21 22	-1,4874	0,0551	-1,5425	-1,432
15 23	2,8885	0,2351	2,6534	3,1236
22 24	2,963	0,1803	2,7827	3,1433
23 24	1,2345	0,1486	1,0859	1,3831
24 25	1,9127	0,0521	1,8606	1,9648
25 26	2,3664	0,1223	2,2441	2,4887
25 27	-0,4721	0,1749	-0,647	-0,2972
28 27	5,2637	0,5425	4,7212	5,8062
27 29	1,6677	0,0976	1,5701	1,7653
27 30	1,6614	0,1004	1,561	1,7618
29 30	0,6055	0,0348	0,5707	0,6403
8 28	-2,4877	0,5728	-3,0605	-1,9149
6 28	-9,7059	0,0234	-9,7293	-9,6825

Tabela G.5: Perdas ativas na transmissão para o FCNSdis

Barra	Perdas ativas (MW)			
	m	α	$m - \alpha$	$m + \alpha$
1 2	5,4688	0,4857	4,9831	5,9545
1 3	2,8009	0,2478	2,5531	3,0487
2 4	1,0964	0,1005	0,9959	1,1969
3 4	0,7687	0,0676	0,7011	0,8363
2 5	3,0005	0,2249	2,7756	3,2254
2 6	2,0601	0,1822	1,8779	2,2423
4 6	0,6278	0,0526	0,5752	0,6804
5 7	0,1489	0,0084	0,1405	0,1573
6 7	0,3657	0,0221	0,3436	0,3878
6 8	0,1033	0,0089	0,0944	0,1122
6 9	0	0	0	0
6 10	0	0	0	0
9 11	0	0	0	0
9 10	0	0	0	0
4 12	0	0	0	0
12 13	0	0	0	0
12 14	0,071	0,0077	0,0633	0,0787
12 15	0,1998	0,0218	0,178	0,2216
12 16	0,0421	0,0049	0,0372	0,047
14 15	0,0048	0,0006	0,0042	0,0054
16 17	0,007	0,0009	0,0061	0,0079
15 18	0,033	0,0037	0,0293	0,0367
18 19	0,0034	0,0004	0,003	0,0038
19 20	0,0192	0,002	0,0172	0,0212
10 20	0,0891	0,0092	0,0799	0,0983
10 17	0,0179	0,0016	0,0163	0,0195
10 21	0,1121	0,012	0,1001	0,1241
10 22	0,0533	0,0057	0,0476	0,059
21 22	0,0005	0,0001	0,0004	0,0006
15 23	0,0268	0,0032	0,0236	0,03
22 24	0,0478	0,0051	0,0427	0,0529
23 24	0,004	0,0007	0,0033	0,0047
24 25	0,0105	0,0003	0,0102	0,0108
25 26	0,0445	0,0049	0,0396	0,0494
25 27	0,0269	0,0034	0,0235	0,0303
28 27	0	0	0	0
27 29	0,0858	0,0094	0,0764	0,0952
27 30	0,1614	0,0177	0,1437	0,1791
29 30	0,0334	0,0037	0,0297	0,0371
8 28	0,0002	0,0003	-0,0001	0,0005
6 28	0,0608	0,0057	0,0551	0,0665

UNICAMP

BIBLIOTECA CENTRAL

SEÇÃO CIRCULANTE