

Universidade Federal de Goiás
Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação

Luiz Gonzaga Rocha Júnior

**METODOLOGIAS PARA A CONSIDERAÇÃO
DE INCERTEZAS NO PROBLEMA DE FLUXO
DE POTÊNCIA DE SISTEMAS DE TRANSMIS-
SÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Goiânia
2021



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

☒ [X] Dissertação ☐ [] Tese

2. Nome completo do autor

Luiz Gonzaga Rocha Júnior

3. Título do trabalho

Metodologias Para a Consideração de Incertezas no Problema de Fluxo de Potência de Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento ☒ [X] SIM ☐ [] NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

a) consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);

b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Lina Paola Garcés Negrete, Professora do Magistério Superior**, em 02/02/2021, às 17:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **LUIZ GONZAGA ROCHA JÚNIOR, Discente**, em 02/02/2021, às 17:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1848392** e o código CRC **1C9C91EB**.

Referência: Processo nº 23070.054155/2020-90

SEI nº 1848392

Luiz Gonzaga Rocha Júnior

METODOLOGIAS PARA A CONSIDERAÇÃO DE INCERTEZAS NO PROBLEMA DE FLUXO DE POTÊNCIA DE SISTEMAS DE TRANSMIS- SÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Federal de Goiás, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Engenharia Elétrica.

Orientador: Profa. Dra. Lina Paola Garcés Negrete

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Rocha Junior, Luiz Gonzaga

Metodologias para a consideração de incertezas no problema de
fluxo de potência de sistemas de transmissão de energia elétrica
[manuscrito] / Luiz Gonzaga Rocha Junior. - 2020.

0 78 f.: il.

Orientador: Profa. Dra. Lina Paola Garces Negrete.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola
de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Goiânia,
2020.

Bibliografia.

Inclui siglas, abreviaturas, gráfico, tabelas, algoritmos, lista de
figuras, lista de tabelas.

1. Sistema de Transmissão de Energia Elétrica. 2. Fluxo de Carga.
3. Incertezas. 4. Fuzzy Logic. I. Garces Negrete, Lina Paola, orient. II.
Título.

CDU 621.3



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº **013/2020** da sessão de Defesa de Dissertação de **Luiz Gonzaga Rocha Júnior**, que confere o título de Mestre em **Engenharia Elétrica e de Computação**, na área de concentração em **Engenharia Elétrica**.

Aos **seis dias do mês de novembro de dois mil e vinte**, a partir das **14h00min.**, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada “**Metodologias Para a Consideração de Incertezas no Problema de Fluxo de Potência de Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica**”. Os trabalhos foram instalados pela Orientadora, Professora Doutora **Lina Paola Garcés Negrete (EMC/UFG)** com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor Doutor **Ricardo Suyama (CECS-UFABC)**, membro titular externo; Professor Doutor **Antônio César Baleeiro Alves (EMC/UFG)**, membro titular interno e Professor Doutor **Gelson Antônio Andrêa Brigatto (EMC/UFG)** membro titular interno. Durante a arguição os membros da banca **não fizeram** sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido o candidato **aprovado** pelos seus membros. Proclamados os resultados pela Professora Doutora **Lina Paola Garcés Negrete**, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos **seis dias do mês de novembro de dois mil e vinte**.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Suyama, Usuário Externo**, em 06/11/2020, às 16:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Lina Paola Garcés Negrete, Professor do Magistério Superior**, em 06/11/2020, às 16:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Antônio Cesar Baleeiro Alves, Usuário Externo**, em 06/11/2020, às 16:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gelson Antonio Andrea Brigatto, Professor do Magistério Superior**, em 06/11/2020, às 16:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **LUIZ GONZAGA ROCHA JÚNIOR**,



Discente, em 06/11/2020, às 17:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1656746** e o código CRC **A2CFE35A**.

Referência: Processo nº 23070.045915/2020-78

SEI nº 1656746

À minha esposa, parceira que me apoia em todos os momentos, aos meus filhos que tanto amo e aos meus pais que reconheço como alicerce de uma vida.

Agradecimentos

Aos João Reis e Daiane Dionizio pelo suporte junto a secretaria.

Aos professores Symone Alcalá e Flávio Henrique pela inspiração.

Ao professor e meu irmão Flávio Rocha, por sempre estar disposto a ajudar e a motivar.

Ao meu amigo Victor Bitencourt por ter me incentivado a iniciar este trabalho.

A minha querida esposa, Neusa Karla, que me deu todo suporte, sem o qual seria impossível trilhar este caminho.

Aos meus pais, Luiz Rocha e Natalice Rocha, que são os alicerces de toda minha vida.

Ao professor Gelson Brigatto, que sempre apresentou uma visão nova para os problemas que se apresentavam.

E um agradecimento mais que especial à professora Lina Garcés, pela orientação, pela paciência, pelo cuidado, palavras certas nos momentos certos, atuação essencial para a realização deste trabalho.

Resumo

Rocha Júnior, Luiz Gonzaga, Metodologias para a consideração de incertezas no problema de fluxo de potência de sistemas de transmissão de energia elétrica. Goiânia, 2020. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, Universidade Federal de Goiás - UFG.

Este trabalho apresenta uma revisão de diversas metodologias de solução de fluxo de potência considerando incertezas que surgem no dia a dia das concessionárias de energia, como imprecisão nas medições, falhas em banco de dados, inserção da experiência do especialista entre outras. Nas metodologias escolhidas, as incertezas são representadas por distribuições de possibilidades *fuzzy*. Como principal contribuição do trabalho, propõe-se uma metodologia em que um sistema de inferência *fuzzy* com entradas *non-singleton* são utilizadas como parte da solução do fluxo de carga. Nesta proposta, funções de pertinência triangulares são usadas na representação das distribuições de possibilidade *fuzzy*. A entrada do sistema de inferência são os *mismatches* de potência líquida ativa e reativa injetada nas barras do sistema e a saída são incrementos das variáveis de estado (módulo e ângulo de fase das tensões nodais) para cada iteração. Além disso, permite-se também a obtenção dos fluxos de potência nas linhas de transmissão e nos transformadores, bem como as perdas de potência ativa, em formato de distribuição de possibilidade *fuzzy*. Sistemas de transmissão de pequeno porte são testados para as diferentes metodologias abordadas com o objetivo de identificar as principais características de cada modelagem e a aritmética envolvida na manipulação dos conjuntos *fuzzy*. Das implementações realizadas, identificaram-se certas dificuldades na manipulação de variáveis *fuzzy* e, apresentaram-se alternativas de solução visando a convergência do problema de fluxo de potência a resultados confiáveis.

Palavras-chave

Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica, Fluxo de Carga, Incertezas, *Fuzzy Logic*.

Abstract

Rocha Júnior, Luiz Gonzaga Methodologies for considering uncertainties in the power flow problem of electrical energy transmission systems. Goiânia, 2020. MSc. Dissertation. Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, Universidade Federal de Goiás - UFG.

This work presents a review of several power flow solution methodologies considering uncertainties that are present in the daily life of energy utilities, such as inaccuracy in measurements, database failures, insertion of the specialist's experience, among others. In the chosen methodologies, the uncertainties are represented by distributions of fuzzy possibilities. As the main contribution of the work, a methodology is proposed in which a fuzzy inference system with non-singleton inputs is used as part of the load flow solution. In this proposal, triangular pertinence functions are used as a representation of fuzzy possibility distributions. The input of the inference system is the mismatches of active and reactive liquid power injected into the system bars and the output is increments of the state variables (module and phase angle of the nodal voltages) for each iteration. In addition, it is also possible to obtain the power flows in the transmission lines and transformers, as well as power losses, in a fuzzy possibility distribution format. Small transmission systems are tested for the different methodologies addressed in order to identify the main characteristics of each model and the arithmetic involved in the handling of fuzzy sets. From the implemented algorithms, certain difficulties were identified in the manipulation of fuzzy variables, and alternative solutions were presented aiming at the convergence of the power flow problem to reliable results.

Keywords

Electrical Power Transmission, Load flow, Uncertainties, Fuzzy Logic

Lista de Figuras

Figura 4.1 – Função de pertinência triangular	17
Figura 4.2 – Soma números <i>fuzzy</i> triangulares	22
Figura 5.1 – Sistema 3 barras	30
Figura 5.2 – Fluxograma do método Newton-Raphson com aproximação analítica	37
Figura 5.3 – Algoritmo do fluxo de carga com FLCs	42
Figura 5.4 – Estrutura do sistema de inferência <i>fuzzy</i> (FLC)	43
Figura 5.5 – Distribuição das funções de pertinência.....	43
Figura 5.6 – Representação da solução do sistema de inferência.....	47
Figura 5.7 – Fluxograma da metodologia Newton-Raphson utilizando controlador <i>fuzzy</i>	48
Figura 5.8 – <i>Mismatch</i> de potência ativa e Incremento de ângulo	49
Figura 5.9 – <i>Mismatch</i> de potência reativa e Incremento de magnitude de tensão	50
Figura 5.10 – Fluxograma da metodologia proposta.....	51
Figura 5.11 – Sistema de Inferência Mamdani de duas entradas, duas regras com entradas <i>crisp</i>	53
Figura 5.12 – Sistema de Inferência Mamdani de duas entradas, duas regras com entradas <i>fuzzy</i>	54
Figura 5.13 – SOM, MOM e LOM de uma distribuição <i>fuzzy</i>	55
Figura 5.14 – Fluxograma do algoritmo da metodologia proposta	56
Figura 5.15 – Evolução do <i>mismatch</i> de potência ativa ao longo das iterações.....	57
Figura 5.16 – Evolução do <i>mismatch</i> de potência reativa ao longo das iterações.....	58
Figura 6.1 – Topologia Sistema 6 barras.....	63
Figura 6.2 – Topologia do sistema de 14 barras.....	68

Lista de Tabelas

Tabela 5.1 – Dados de barra do sistema 3 barras	30
Tabela 5.2 – Dados dos ramos do sistema 3 barras	31
Tabela 5.3 – Ângulos de fase das tensões nas barras	31
Tabela 5.4 – Fluxo de potência ativa nos ramos	31
Tabela 5.5 – Resultados do PFNR convencional	38
Tabela 5.6 – Fluxos nos ramos usando PFNR convencional	38
Tabela 5.7 – Desvios das potências [MW]	39
Tabela 5.8 – Desvios para magnitudes e os ângulos das tensões nas barras	39
Tabela 5.9 – Magnitudes e ângulos das tensões nas barras	40
Tabela 5.10 – Desvios para os fluxos de potência ativa e reativa	40
Tabela 5.11 – Fluxos de potência ativa e reativa nos ramos	40
Tabela 5.12 – Desvios para as perdas ativas [MW]	41
Tabela 5.13 – Perdas ativas [MW] nos ramos	41
Tabela 5.14 – Resultados - Dados de barras.....	50
Tabela 5.15 – Resultados - Fluxo de potência nos ramos	50
Tabela 5.16 – Resultados para as tensões nodais	58
Tabela 5.17 – Fluxos de potências ativas e reativas nos ramos.....	58
Tabela 5.18 – Siglas das Metodologias	59
Tabela 5.19 – Módulos e ângulos de fase das tensões nodais	60
Tabela 5.20 – Fluxos de potência nos ramos.....	60
Tabela 5.21 – Ângulos de fase das tensões	60
Tabela 5.22 – Magnitude de tensão na barra 2	60
Tabela 5.23 – Fluxos de potência nos ramos – Potência ativa	61
Tabela 5.24 – Fluxo de potência nos ramos – Potência reativa.....	61
Tabela 5.25 – Perdas de potência ativa nos ramos	61
Tabela 6.1 – Dados de potência de barra do sistema 6 barras	64
Tabela 6.2 – Dados dos ramos do sistema 6 barras	64
Tabela 6.3 – Tensões nas barras (magnitude e ângulo).....	65

Tabela 6.4 – Fluxos de potência nos ramos.....	65
Tabela 6.5 – Ângulos das tensões nas barras.....	66
Tabela 6.6 – Magnitude das tensões nodais	66
Tabela 6.7 – Fluxos de potência nos ramos – Potência ativa	66
Tabela 6.8 – Fluxos de potência nos ramos – Potência reativa	67
Tabela 6.9 – Perdas de potência ativa nos ramos	67
Tabela 6.10 – Magnitudes de tensão nas barras tipo PV	68
Tabela 6.11 – Dados de potência de barra do sistema 14 barras	69
Tabela 6.12 – Dados dos ramos do sistema 14 barras	69
Tabela 6.13 – Magnitudes e ângulos de fase das tensões nodais	70
Tabela 6.14 – Fluxos de potência pelos ramos.....	70
Tabela 6.15 Ângulos de fase das tensões	71
Tabela 6.16 Magnitudes das tensões nas barras	72
Tabela 6.17 – Fluxos de potência ativa pelos ramos	72
Tabela 6.18 – Fluxos de potência reativa pelos ramos	73

Sumário

CAPÍTULO 1	1
Introdução	1
CAPÍTULO 2	5
Referencial Bibliográfico	5
CAPÍTULO 3	8
Fluxo de Carga teorias e conceitos gerais	8
3.1 Método de Newton-Raphson (PFNR).....	10
3.2 Método de Newton-Raphson Desacoplado (PFD).....	13
3.3 Método Linearizado (PFL)	15
CAPÍTULO 4	17
Aritmética Fuzzy	17
4.1 Conjuntos <i>Fuzzy</i>	17
4.2 Aritmética <i>Fuzzy</i>	18
4.2.1 Representação de números <i>fuzzy</i> através de α -cuts	18
4.2.2 Adição e subtração de conjuntos <i>fuzzy</i>	19
4.2.3 Multiplicação.....	22
4.2.4 Divisão	23
4.2.5 Seno e Cosseno	23
CAPÍTULO 5	28
Metodologias para a solução do problema de Fluxo de Carga com variáveis fuzzy	28
5.1 Método Linearizado (PFLF)	28
5.1.1 Formulação.....	28
5.1.2 Exemplo ilustrativo	30
5.2 Método de Newton-Raphson – Aproximação Analítica (PFNRF)	32
5.2.1 Formulação.....	32
5.2.2 Exemplo Ilustrativo	38

5.3	Sistema de Inferência <i>Fuzzy</i> (PFDFC).....	41
5.3.1	Formulação.....	41
5.3.2	Exemplo Ilustrativo	49
5.4	Metodologia Proposta (PFDF)	51
5.4.1	Formulação.....	51
5.4.2	Exemplo Ilustrativo	57
5.5	Comparação das Metodologias.....	59
 CAPÍTULO 6.....		 63
Testes e análise de resultados.....		63
6.1	Sistema 6 (seis) Barras	63
6.1.1	Dados do sistema.....	63
6.1.2	Resultados	64
6.2	Sistema 14 (catorze) Barras	68
6.2.1	Dados do sistema.....	68
6.2.2	Resultados	70
 CAPÍTULO 7.....		 74
Conclusões e trabalhos futuros		74
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		 76

Capítulo 1

Introdução

Um sistema elétrico de potência consiste em três componentes principais: as estações geradoras, as linhas de transmissão e os sistemas de distribuição; as linhas de transmissão ligam as estações geradoras aos sistemas de distribuição; um sistema de distribuição liga todas as cargas individuais de uma determinada área às linhas de transmissão [1] .

Durante muitos anos, o sistema elétrico se resumiu a isto, porém com a evolução rápida no crescimento das cargas um novo cenário tem se apresentado. O crescimento da população e o desenvolvimento tecnológico contínuo exigem uma demanda de energia cada vez maior. Assim, quando o aumento na demanda ultrapassa os limites do sistema, é necessária a construção de novas unidades de geração de grande porte bem como o sistema que suporte a transmissão e distribuição desta nova parcela de energia gerada. Este modelo começou a ser questionado com o surgimento de novas tecnologias que reduzem o custo da energia gerada. Aliado à dificuldade crescente de financiamento de grandes centrais de geração estão os problemas relacionados ao impacto ambiental associado à implantação destas grandes centrais. Todos estes fatores contribuíram para a valorização da geração distribuída [2].

Para o eficiente planejamento e operação do sistema elétrico é essencial uma modelagem computacional, mais fiel possível, para que estudos simulados possam ser realizados. O cálculo de fluxo de carga em uma rede de energia elétrica consiste essencialmente na determinação do estado da rede, da distribuição dos fluxos e de algumas outras grandezas de interesse. Neste tipo de problema, a modelagem do sistema é estática, significando que a rede é representada por um conjunto de equações e inequações algébricas não-lineares [3].

A modelagem do sistema é envolta em inúmeras variáveis que apresentam algum grau

de incerteza. Há situações onde modelos determinísticos ou probabilísticos podem não ser adequados por não capturar qualitativamente o conhecimento e experiência do engenheiro, ou falha em descrever os tipos de incertezas envolvidas nos diversos cenários [4].

Os dados, nos campos gerais da ciência humana, são determinísticos ou aleatórios ou incertos. A análise do sistema de energia não é exceção para esta regra e, modelos para esse sistema até agora mais utilizados ou mesmo considerados incorporam apenas abordagens determinísticas e probabilísticas, o primeiro em um grau muito mais elevado do que o último. No entanto, especialistas concordam facilmente que a natureza de muitos aspectos a serem modelados é mais relacionada à imprecisão ou incerteza do que a qualquer outra forma de conhecimento. Isso é particularmente verdadeiro em problemas de previsão ou planejamento, onde a projeção de dados do passado para o futuro não pode ser considerada como um procedimento consistente sobre fenômenos estacionários, porque a natureza humana está sempre envolvida de alguma forma, as amostras não são bastante significativas e / ou ambiente está variando rapidamente e fortemente. Muitos modelos chamados "probabilísticos" estão, na verdade, tentando capturar essa imprecisão. Mas o conceito de probabilidade é geralmente relacionado à frequência de ocorrência de eventos, capturado por experimentos repetidos cujos resultados são registrados. Imprecisão, por outro lado, deriva do conhecimento humano incompleto e da imprecisão das declarações da linguagem natural [5].

A coleta de informações para simular as várias topologias de operação do sistema agrega erros de precisão nos medidores, transformadores de corrente, na transmissão desses dados, entre outros. Além disso, a entrada em operação de grande número de gerações distribuídas no sistema tem aumentado consideravelmente as incertezas para a operação dele. Em algumas situações dispõe-se somente de uma descrição qualitativa das cargas [6]. Muitas vezes os dados disponíveis não são determinísticos nem probabilísticos, por exemplo, julgamentos como: “A carga da barra 2 será aproximadamente 12 MW”, ou “A carga na barra 3 é principalmente do tipo industrial”, ou então, “O fluxo na linha de transmissão 2 será quase 10 MW”, o que nos leva a buscar ferramentas mais adequadas para lidar com essa falta de precisão [4].

A teoria dos conjuntos *fuzzy* oferece uma maneira de entender esses problemas e permite incorporar a própria intuição, inteligência e conhecimento adquiridos em resolvê-los no passado. Essas incertezas podem ser adequadamente modeladas com a ajuda da teoria dos conjuntos *fuzzy*.

Em relação à operação de sistemas de energia elétrica, um método de cálculo de fluxo de carga *fuzzy* surge com base em conjuntos *fuzzy* que encontram soluções de fluxo de carga precisas quando potências nodais incertas são dadas como números *fuzzy*. Imprecisão e incertezas na análise do fluxo de potência são modeladas usando a teoria de lógica difusa (*fuzzy logic*) também conhecida como lógica nebulosa.

Imprecisão na geração de energia e cargas usadas em uma análise de fluxo de potência implica imprecisão nas saídas. Cálculos de fluxo de potência são uma das mais importantes ferramentas computacionais para o planejamento e operação de sistemas elétricos de potência. Após a consolidação dos métodos de cálculo de fluxo de potência determinística, a necessidade para capturar a incerteza na definição da carga levou primeiro ao desenvolvimento de modelos de dados probabilísticos, e posteriormente para abordagens *fuzzy* capazes de lidar com declarações qualitativas e outras informações não probabilísticas sobre o valor das cargas.

Essas incertezas estão presentes no dia a dia e nos problemas da vida real. Dessa forma, faz sentido modelar as incertezas onde cada uma delas deve ser atribuída um grau de pertinência que representa o grau de participação do parâmetro em estudo [7].

Vale ressaltar que nas metodologias apresentadas na literatura, as operações matemáticas básicas de soma e subtração entre números difusos são necessárias. Porém, subtrações entre números *fuzzy* geralmente implicam um aumento significativo na imprecisão dos números resultantes. A forma de realizar essas operações pode conduzir a resultados de simulação irrealistas [8]. Além disso, em [9] apresenta-se a importância das operações *fuzzy* se adaptar a cada necessidade e os autores apresentam uma metodologia para multiplicação de números *fuzzy* mais adequada para a execução de fluxo de carga, além de uma fórmula para cálculo *fuzzy* das funções seno e cosseno .

Diante das várias possibilidades que surgem com as diversas formas que as operações aritméticas básicas *fuzzy* podem apresentar, procuramos neste trabalho aproveitar esses aspectos relacionados com a lógica difusa para lidar com as incertezas presentes na análise de fluxo de potência. Inicialmente, tomou-se como referência o trabalho apresentado em [6] onde se utiliza um sistema de inferência em parte da solução do problema de fluxo de carga. Uma primeira alteração consistiu em adaptar o sistema para aceitar entradas *fuzzy* ao invés de entrada de dados *crisp* (entradas que pertencem ou não pertencem a um conjunto, ou seja, não há grau de incerteza envolvido) como é apresentado em [6].

Além da proposta mencionada anteriormente, neste trabalho, serão também revistas algumas metodologias que usam a aritmética *fuzzy* na resolução do problema de fluxo de carga. Iniciaremos com o método linearizado, que será reformulado de tal forma a considerar as variáveis de entrada como variáveis *fuzzy*, além de ter sido alterada a ordem tradicional dos cálculos para adiar as subtrações de números *fuzzy*. Será também apresentada uma formulação através de aritmética *fuzzy* para a manipulação das equações básicas do Método de Newton-Raphson para o cálculo das variáveis de estado (módulos e ângulos de fase das tensões nodais) bem como do cálculo dos fluxos pelas linhas e as perdas de potências, resultados que serão expressos como distribuições de possibilidade *fuzzy*. Como uma extensão à pesquisa, as aproximações necessárias no problema de fluxo de potência desacoplado rápido para permitir a consideração de entradas *fuzzy* também serão abordadas.

A estrutura deste trabalho é como segue: inicia-se com uma revisão bibliográfica dos trabalhos que motivaram a realização desta pesquisa. Seguidamente, no Capítulo 3 são revisados os conceitos gerais da formulação do problema de fluxo de carga. O Capítulo 4 contém as definições das operações básicas da aritmética e conjuntos *fuzzy*. No capítulo 5 apresentam-se as diversas metodologias para o fluxo de potência envolvendo variáveis *fuzzy*. Iniciando pela aproximação do método linearizado, seguida pela formulação analítica do método de Newton-Raphson desacoplado. A seguir, a proposta de um controlador *fuzzy* que utiliza os valores *crisp* das variáveis para realizar a inferência matemática na obtenção dos resultados e, finalmente, a metodologia proposta nesta dissertação onde é proposto um controlador que utiliza variáveis de entrada como distribuições de possibilidade *fuzzy*. Os diferentes testes realizados e seus respectivos resultados serão mostrados no capítulo 6. Por fim, as principais conclusões e a proposta de trabalhos futuros serão apresentadas no capítulo 7.

Capítulo 2

Referencial Bibliográfico

Vários estudos lidam com as incertezas nos sistemas elétricos de potência com duas abordagens principais: métodos baseados na teoria probabilística e métodos baseados na aritmética alternativa como a intervalar e a difusa/nebulosa, também conhecida como *fuzzy* [10]. Sendo que os trabalhos que se baseiam na teoria *fuzzy* se inspiram nas ferramentas desenvolvidas por Zadeh [11] para incorporar as incertezas nos modelos de fluxo de carga. Em [11], um conjunto *fuzzy* é uma classe de objetos com um *continuum* de graus de pertinência. Tal conjunto é caracterizado por uma função de pertinência (característica) que atribui a cada objeto um grau de pertinência que varia entre zero e um. As noções de inclusão, união, intersecção, complemento, relação, convexidade, etc., são estendidas a tais conjuntos, e várias propriedades no contexto de conjuntos *fuzzy* são estabelecidas.

No que se refere à abordagem *fuzzy*, conforme ressaltado em [12], muitos trabalhos têm sido publicados, considerando as cargas e gerações de energia como números *fuzzy* (ou distribuições de possibilidade) e obtendo como resultados, distribuições de possibilidade para os valores de ângulos e módulos de tensão, fluxos, perdas e gerações que não eram conhecidas a priori. Embora os cálculos envolvidos no fluxo de potência *fuzzy* sejam muito mais simples do que no caso probabilístico, ainda existe uma dificuldade de aplicação no modelo completo dos sistemas. Assim, geralmente são utilizados modelos linearizados e os resultados obtidos também são aproximados.

Em [13] é apresentado um método para cálculo do fluxo CC para sistemas de transmissão, e análise de fluxo ótimo em sistema com incertezas. Em [4] foram apresentados métodos para o fluxo de potência *fuzzy* CC e CA, baseados em técnica de linearização em torno de uma solução determinística. Desde então, vários trabalhos publicados nesse assunto passaram a utilizar este método denominado em [12] como *Modelo Clássico*, como principal referência e para fins de comparação de resultados.

Em [14], as cargas e gerações são representadas como números *fuzzy*, onde as distribuições de possibilidades são representadas por funções de pertinência do tipo trapezoidal na forma L-R conforme definido em [15]. É utilizado o método de Newton-Raphson, onde todas as variáveis são modeladas por números *fuzzy*, exceto os parâmetros das linhas. As grandezas resultantes do problema de fluxo de potência apresentam uma forma de distribuição de possibilidade aproximadamente trapezoidal.

Em [6] é proposto o uso de um sistema de inferência *fuzzy*, também chamado de controlador *fuzzy*, para auxiliar no cálculo do fluxo de carga, com o uso de entradas *crisp* e revisitado por [16]. Neste método, o incremento nas variáveis de estado que ocorre em cada iteração, representadas pelas magnitudes e ângulo da tensão nas barras ($\Delta\theta$ e ΔV) são saídas de um sistema de inferência *fuzzy* cujas entradas são os *mismatches* de potência ativa (ΔP) e reativa (ΔQ) nas respectivas barras. Este processo substitui a multiplicação dos vetores ΔP e ΔQ pelas matrizes $[B']^{-1}$ e $[B'']^{-1}$ para determinação de $\Delta\theta$ e ΔV .

Em contrapartida ao controlador apresentado em [6], em [17] é discutido o uso de um sistema de inferências com entradas *fuzzy*, porém não se aplicando ainda especificamente à solução do problema de fluxo de carga. Uma representação precisa de controladores de lógica *fuzzy* por meio de mapeamentos é usada para apresentar diferentes maneiras de lidar com entradas difusas. Dois tipos de entradas *fuzzy* são apresentados e seu uso potencial no controle *fuzzy* é apresentado. Na mesma linha, em [18] considera-se uma forma particular de lidar com entradas de ruídos em sistema de inferência *fuzzy*, transformando a distribuição de ruído em um conjunto *fuzzy* e, em seguida, alimentando de volta o sinal *fuzzy* obtido para a entrada do sistema de inferência. O trabalho apresentado em [19] detalha a teoria para solução de sistema de inferência com entradas *non-singleton*, ou seja, entradas *fuzzy*.

Em [20] é apresentada uma nova abordagem para o sistema de inferência apresentado em [6] utilizando a lógica *fuzzy* para ajustar parâmetros de modo a atender às restrições durante o estudo do fluxo de carga, onde os parâmetros a serem ajustados incluem impedância de linha de transmissão, ângulo de fase e posição de tap do transformador além de capacidade de transmissão das linhas.

Em [21] é proposto um cálculo de fluxo de carga linear com as cargas e gerações sendo modeladas como números *fuzzy*. Em [22], um modelo de fluxo de carga *fuzzy* CA (Corrente

Alternada) é apresentado, no qual os dados *fuzzy* são utilizados para obter distribuições possíveis de tensões, fluxos e perdas ativas e reativas, correntes e potências geradas. Essas distribuições são comparadas com as obtidas através de uma simulação Monte Carlo, a fim de avaliar os erros inerentes ao fluxo de carga *fuzzy* CA.

A referência [23] apresenta um fluxo de potência *fuzzy* para redes de distribuição fracamente malhadas balanceadas ou desbalanceadas, lidando com incertezas tanto nas entradas do problema quanto nos parâmetros do sistema, tais como parâmetros de linhas de transmissão.

Finalmente, a estimativa de perda de energia (kWh) dos sistemas de distribuição é uma tarefa importante para a operação e o planejamento do sistema. Como as perdas são obtidas por meio de estimativa, é essencial fornecer um intervalo nebuloso (difuso ou *fuzzy*) de perdas aos engenheiros. Um método baseado na aritmética *fuzzy* e na regressão *fuzzy* em *cluster* é proposto para estimar perdas em [24].

Capítulo 3

Fluxo de Carga teorias e conceitos gerais

As informações obtidas de um estudo de fluxo de carga são, em geral, o módulo e a fase da tensão em cada barra e a potência ativa e reativa que fluem em cada linha [1]. O problema do fluxo de carga pode ser formulado por um sistema de equações e inequações algébricas não-lineares que correspondem, respectivamente, às leis de Kirchhoff e a um conjunto de restrições operacionais da rede elétrica e de seus componentes. Na formulação mais simples do problema, a cada barra da rede são associadas quatro variáveis, sendo que duas delas entram no problema como dados e duas como incógnitas [3]:

V_k - magnitude da tensão nodal na barra k ;

θ_k - ângulo da tensão nodal na barra k ;

P_k - geração líquida (geração menos carga) de potência ativa na barra k ;

Q_k - injeção líquida de potência reativa na barra k .

Dependendo de quais variáveis nodais entram como dados e quais são consideradas como incógnitas, definem-se três tipos de barras [3]:

PQ – São dados P_k e Q_k e calculados V_k e θ_k ;

PV – São dados P_k e V_k e calculados Q_k e θ_k ;

V0 – Referência – são dados V_k e θ_k e calculados P_k e Q_k .

O conjunto de equações do problema do fluxo de carga é formado por duas equações para cada barra, cada uma delas representando o fato de as potências ativas e reativas injetadas em uma barra serem iguais à soma dos fluxos correspondentes que deixam a barra através de linhas de transmissão, transformadores etc. Isso corresponde à imposição da Primeira Lei de Kirchhoff e pode ser expresso matematicamente como segue, conforme [3]:

$$P_k = V_k \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (3.1)$$

$$Q_k = V_k \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (3.2)$$

Em que,

$k = 1 \dots \text{NB}$, sendo NB o número de barras da rede;

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

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

O problema da solução de fluxo de carga pode ser decomposto em dois subsistemas de equações algébricas conforme pode-se observar a seguir.

Subsistema 1, sistema de 2 NPQ+NPV equações algébricas não-lineares com o mesmo número de incógnitas conforme pode ser observado nas equações (3.3) e (3.4). Onde NPQ é o número de barras PQ e NPV é o número de barras PV do sistema. Neste sistema, as incógnitas são implícitas, o que exige um processo iterativo de resolução.

$$P_k^{esp} - V_k \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) = 0 \quad (3.3)$$

Para barras PQ e PV

$$Q_k^{esp} - V_k \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) = 0 \quad (3.4)$$

Para barras PQ

Em que,

P_k^{esp} = Injeção líquida de potência ativa especificada para barra k ;

Q_k^{esp} = Injeção líquida de potência reativa especificada para barra k ;

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

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

Subsistema 2, trata-se de um sistema com NPV+2 equações algébricas não-lineares com o mesmo número de incógnitas, no qual todas as incógnitas aparecem de forma explícita, o que torna trivial o processo de resolução. O objetivo é obter as injeções P_k e Q_k na barra de referência e Q_k nas barra PV, através das equações (3.1) e (3.2).

Importante salientar que no processo de resolução apresentado anteriormente não foram consideradas as restrições de operação e a atuação de dispositivos de controle que correspondem a um conjunto adicional de inequações/equações [3].

Como apresentado em [3], as funções apresentadas anteriormente para o subsistema 1 podem ser desenvolvidas e apresentadas em formato vetorial conforme a equação (3.5).

$$g(x) = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P^{esp} - P(V, \theta) \\ Q^{esp} - Q(V, \theta) \end{bmatrix} = 0 \quad (3.5)$$

Este sistema de equações algébricas não-lineares pode ser resolvido por vários métodos numéricos, sendo que os mais eficientes são os métodos de Newton-Raphson e o desacoplado rápido [3], que serão apresentados a seguir, além de um método linearizado.

3.1 Método de Newton-Raphson (PFNR)

Trata-se de um algoritmo numérico para solução de equações não-lineares utilizando-se processo iterativo. Considere-se inicialmente um sistema $g(x) = 0$ sendo $g(x)$ uma função vetorial de dimensão n e x o vetor das incógnitas de dimensão n , cuja notação é mostrada a seguir:

$$g(x) = [g_1(x), g_2(x), \dots, g_n(x)]^t \quad (3.6)$$

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^t \quad (3.7)$$

Conforme algoritmo apresentado em [3] é realizada a linearização da função vetorial $g(x)$ para $x = x^v$ utilizando os dois primeiros termos da série de Taylor, para iteração v .

$$g(x^v + \Delta x^v) \cong g(x^v) + J(x^v)\Delta x^v \quad (3.8)$$

Sendo $[J]$ a matriz jacobiana dada por

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1(x)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_1(x)}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial g_n(x)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_n(x)}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

O vetor Δx é calculado impondo-se que:

$$g(x^v) + J(x^v)\Delta x^v = 0 \quad (3.10)$$

Logo,

$$g(x^v) = -J(x^v)\Delta x^v \quad (3.11)$$

No caso em que o sistema de equações a ser resolvido é o subsistema 1:

$$g(x^v) = \begin{bmatrix} \Delta P^v \\ \Delta Q^v \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Onde, ΔP^v tem dimensão NPQ+NPV e ΔQ^v tem dimensão NPQ.

$$\Delta x^v = \begin{bmatrix} \Delta \theta^v \\ \Delta V^v \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Onde, $\Delta \theta^v$ tem dimensão NPQ+NPV e ΔV^v tem dimensão NPQ.

$$J(x^v) = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta P}{\partial V} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Como ΔP e ΔQ são dados pelas equações (3.3) e (3.4), e P^{esp} e Q^{esp} são constantes, a matriz jacobiana pode ser reescrita como:

$$[J] = - \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

A matriz jacobiana é normalmente subdividida em submatrizes $[H]$, $[N]$, $[M]$ e $[L]$ conforme a seguir:

$$[H] = \frac{\partial P}{\partial \theta}; \quad [N] = \frac{\partial P}{\partial V}; \quad [M] = \frac{\partial Q}{\partial \theta}, \quad [L] = \frac{\partial Q}{\partial V} \quad (3.16)$$

Considerando-se k e m os índices das barras do sistema, temos que as submatrizes da equação (3.16) são obtidas pelas equações (3.17) a (3.24) [3]:

$$H_{kk} = \frac{\partial P_k^{calc}}{\partial \theta_k} = V_k \sum_{m \in \Omega_k} V_m (B_{km} \cos \theta_{km} - G_{km} \sin \theta_{km}) \quad (3.17)$$

$$H_{km} = \frac{\partial P_k^{calc}}{\partial \theta_m} = V_k V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (3.18)$$

$$N_{kk} = \frac{\partial P_k^{calc}}{\partial V_k} = 2V_k G_{kk} + \sum_{m \in \Omega_k} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (3.19)$$

$$N_{km} = \frac{\partial P_k^{calc}}{\partial V_m} = V_k (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (3.20)$$

$$M_{kk} = \frac{\partial Q_k^{calc}}{\partial \theta_k} = V_k \sum_{m \in \Omega_k} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (3.21)$$

$$M_{km} = \frac{\partial Q_k^{calc}}{\partial \theta_m} = -V_k V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (3.22)$$

$$L_{kk} = \frac{\partial Q_k^{calc}}{\partial V_k} = -2V_k B_{kk} + \sum_{m \in \Omega_k} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (3.23)$$

$$L_{km} = \frac{\partial Q_k^{calc}}{\partial V_m} = V_k (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (3.24)$$

Então, para a solução do problema através do método Newton-Raphson inicializa-se os valores de magnitude e ângulo de tensão das barras. Em seguida calcula-se as potências P_k para as barras PQ e PV e Q_k para as barras PQ. Obtêm-se os resíduos por barra designados como ΔP_k e ΔQ_k . A seguir testa-se a convergência: se $\text{Max}(|\Delta P_k|) \leq \varepsilon_p$ e $\text{Max}(|\Delta Q_k|) \leq \varepsilon_q$, o sistema convergiu para a solução, sendo ε_p e ε_q , os mismatches de cada barra. Caso não haja

convergência segue-se para determinação da matriz jacobiana, para enfim, determinar os incrementos das variáveis de estado θ e V através das equações (3.25), (3.26) e (3.27).

$$\theta^{v+1} = \theta^v + \Delta\theta^v \quad (3.25)$$

$$V^{v+1} = V^v + \Delta V^v \quad (3.26)$$

$$\begin{bmatrix} \theta^{(v+1)} \\ V^{(v+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta^{(v)} \\ V^{(v)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [H^{(v)}] & [N^{(v)}] \\ [M^{(v)}] & [L^{(v)}] \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P^{(v)} \\ \Delta Q^{(v)} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Com os novos valores de θ e V reinicia-se o processo iterativo até que se atenda o critério de convergência mencionado anteriormente.

Este é um método de solução do problema do fluxo de carga muito utilizado pela sua velocidade de convergência, sua insensibilidade em relação a escolha da barra de referência do sistema e em geral a convergência é mais garantida que em outros métodos tradicionalmente utilizados.

3.2 Método de Newton-Raphson Desacoplado (PFD)

Os métodos desacoplados, como o próprio nome sugere, baseiam-se no desacoplamento $P\theta - QV$, ou seja, são obtidos considerando-se o fato de as sensibilidades $\partial P/\partial\theta$ e $\partial Q/\partial V$ serem mais intensas que as sensibilidades $\partial P/\partial V$ e $\partial Q/\partial\theta$. Este tipo de relação, em geral, é verificado para redes de transmissão em extra-alta tensão (EAT > 230 kV) e ultra-alta tensão (UAT > 750 kV). O desacoplamento possibilita a adoção de um esquema de resolução segundo o qual os subproblemas $P\theta$ e QV são resolvidos alternadamente, em que na resolução do subproblema $P\theta$ são utilizados os valores atualizados de V e na resolução do subproblema QV são utilizados os valores atualizados de θ [3].

A dedução do método de Newton-Raphson desacoplado é feita em duas etapas: desacoplamento e aplicação do esquema alternado de resolução. Pelo desacoplamento $P\theta - QV$ os termos $[N\Delta V]$ e $[M\Delta\theta]$ são ignorados o que torna possível colocar o algoritmo de Newton-Raphson na forma mostrada a seguir conforme é descrito em [3].

$$\Delta P(V^v, \theta^v) = H(V^v, \theta^v) \Delta \theta^v \quad (3.28)$$

$$\theta^{v+1} = \theta^v + \Delta \theta^v \quad (3.29)$$

$$\Delta Q(V^v, \theta^v) = L(V^v, \theta^v) \Delta V^v \quad (3.30)$$

$$V^{v+1} = V^v + \Delta V^v \quad (3.31)$$

Conforme descrito em [3] as equações do método de Newton-Raphson desacoplado podem ser colocadas na forma:

$$[\Delta P/V] = [H'][\Delta \theta] \quad (3.32)$$

$$[\Delta Q/V] = [L'][\Delta V] \quad (3.33)$$

Podemos modificar as equações acima como representamos abaixo, e nomeamos o método como desacoplado rápido, nos quais aparecem as matrizes constantes $[B']$ e $[B'']$.

$$[\Delta P/V] = [B'][\Delta \theta] \quad (3.34)$$

$$[\Delta Q/V] = [B''][\Delta V] \quad (3.35)$$

Onde as matrizes B' e B'' são determinadas pelas equações:

$$B'_{kk} = \sum_{m=1}^{NB} x_{km}^{-1} \quad (3.36)$$

$$B'_{km} = -x_{km}^{-1} \quad (3.37)$$

$$B''_{kk} = -B_{kk} \quad (3.38)$$

$$B''_{km} = -B_{km} \quad (3.39)$$

Sendo que na solução do desacoplado rápido são introduzidas as seguintes aproximações: $\cos \theta_{km}$ é muito próximo de 1, B_{km} é, em magnitude, muito maior que $G_{km} \sin \theta_{km}$, $B_{kk} V_k^2$ é, em magnitude, muito maior que Q_k .

3.3 Método Linearizado (PFL)

O método linearizado se baseia na proporcionalidade entre a abertura angular numa linha de transmissão e seu fluxo de potência ativa. É utilizado um modelo simplificado do sistema de forma a obtermos soluções rápidas e de baixo custo computacional. No entanto, este método não é aplicável para sistema de distribuição em baixa tensão (menor ou igual a 1.000 V), nos quais os fluxos de potência dependem de maneira significativa da queda de tensão. O fluxo de carga linearizado é baseado no acoplamento entre as variáveis P e θ apresentando resultados melhores para sistemas de alta tensão. É importante observar que este método não leva em conta as magnitudes das tensões nodais, as potências reativas e os taps dos transformadores, por esta razão não pode substituir por completo os métodos não-lineares, mas apresenta muita utilidade principalmente em estudos preliminares.

Considere os fluxos de potência ativa nas duas extremidades de uma linha de transmissão conforme deduzido em [3].

$$P_{km} = V_k^2 g_{km} - V_k V_m g_{km} \cos \theta_{km} - V_k V_m b_{km} \sin \theta_{km} \quad (3.40)$$

$$P_{mk} = V_m^2 g_{km} - V_k V_m g_{km} \cos \theta_{km} + V_k V_m b_{km} \sin \theta_{km} \quad (3.41)$$

Se desprezarmos as perdas de transmissão, temos:

$$P_{km} = -P_{mk} = -V_k V_m b_{km} \sin \theta_{km} \quad (3.42)$$

Introduzindo as seguintes aproximações:

$$V_k \cong V_m \cong 1 \text{ pu} \quad (3.43)$$

$$\sin \theta_{km} \cong \theta_{km} \quad (3.44)$$

$$b_{km} \cong \frac{-1}{x_{km}} \quad (3.45)$$

Logo, o fluxo P_{km} pode ser aproximado por:

$$P_{km} = x_{km}^{-1} \theta_{km} = \frac{\theta_k - \theta_m}{x_{km}} \quad (3.46)$$

Sendo que, de forma matricial a solução se resume em resolver:

$$[P] = [B'][\theta] \quad (3.47)$$

Em que,

P = vetor das injeções líquidas de potência ativa

B' = matriz tipo admitância nodal e cujos elementos podem ser obtidos usando as equações (3.28) e (3.39).

θ = vetor dos ângulos das tensões nodais

Neste trabalho, as formulações dos métodos anteriores precisarão ser manipuladas de tal forma a permitir a incorporação de variáveis *fuzzy* nos modelos matemáticos usados e, consequentemente a inclusão da aritmética *fuzzy* para a realização das operações básicas entre as variáveis do problema de fluxo de carga. Sendo que a ordem convencional utilizada das operações será alterada de forma a adiar a operação de subtração, que tem se mostrado uma operação muito sensível no universo *fuzzy*.

Capítulo 4

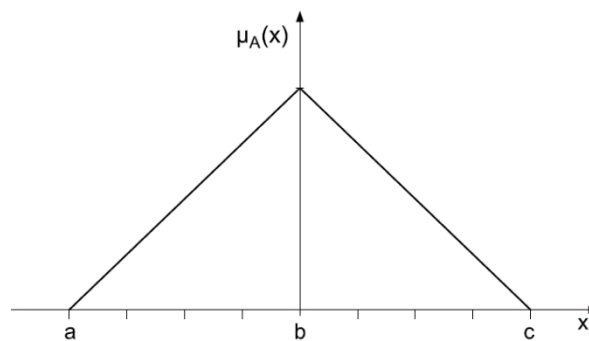
Aritmética Fuzzy

4.1 Conjuntos *Fuzzy*

Seja \mathbf{U} o universo de discurso, ou conjunto universal, que contém todos os elementos possíveis de interesse para cada contexto específico de aplicação. Um conjunto clássico A_c *crisp*, subconjunto de \mathbf{U} , pode ser definido por uma função de pertinência para A_c chamada $\mu_{A_c}(x)$, [8] tal que:

$$\mu_{A_c}(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \in A_c \\ 0 & \text{se } x \notin A_c \end{cases} \quad (4.1)$$

Figura 4.1 – Função de pertinência triangular



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Por outro lado, um conjunto *fuzzy* em \mathbf{U} é caracterizado por uma função de pertinência $\mu_{A_d}(x)$ que possui valores reais no intervalo $[0,1]$. Portanto, um conjunto *fuzzy* é uma generalização de um conjunto clássico que permite que os membros definam valores contínuos no intervalo contínuo $[0,1]$. A função de pertinência de um conjunto clássico somente possui valores 1 ou 0, especificando se um elemento pertence ou não pertence ao conjunto. Um conjunto *fuzzy* \tilde{A}_d em \mathbf{U} pode ser representado por um par ordenado composto por um elemento genérico x e

seu valor de pertinência a este conjunto como pode ser observado na equação (4.2) [8].

$$\tilde{A}_d = \{(x, \mu_{Ad}(x)) \mid x \in U\} \quad (4.2)$$

Além disso, um α -cut de um conjunto *fuzzy* \tilde{A}_d é um conjunto clássico A_α que contém todos os elementos em U com valor de pertinência em \tilde{A}_d maior ou igual a α , como pode ser observado na equação (4.3) [8].

$$A_\alpha = \{x \in U \mid \mu_{Ad}(x) \geq \alpha, \alpha \in [0,1]\} \quad (4.3)$$

4.2 Aritmética *Fuzzy*

4.2.1 Representação de números *fuzzy* através de α -cuts

Um dos tipos de números *fuzzy* frequentemente utilizados, são com os que possuem as funções de pertinência no formato triangular conforme figura 4.1. Na equação (4.4) é apresentada a função de pertinência para um número *fuzzy* \tilde{A} .

$$\mu_A(x) = \mu_A(x; a, b, c) = \begin{cases} \frac{(x-a)}{(b-a)}, & \text{se } a \leq x \leq b \\ \frac{(c-x)}{(c-d)}, & \text{se } b \leq x \leq c \\ 0, & \text{se } x > c \text{ ou } x < a \end{cases} \quad (4.4)$$

A representação dos α -cuts em números *fuzzy* triangulares é conseguido através de funções dependentes de α para ambos os limites esquerdo e direito do triângulo. Desta forma, os α -cuts para o número *fuzzy* \tilde{A} são definidos conforme equações (4.6) e (4.7).

$$A_\alpha = [a_\alpha^-, a_\alpha^+] \quad (4.5)$$

Em que,

$$a_{\alpha}^{-} = (b - a)\alpha + a \quad (4.6)$$

$$a_{\alpha}^{+} = (b - c)\alpha + c \quad (4.7)$$

4.2.2 Adição e subtração de conjuntos *fuzzy*

Sejam dois números \tilde{A} e \tilde{B} dois números *fuzzy* e $A_{\alpha} = [a_{\alpha}^{-}, a_{\alpha}^{+}]$, e $B_{\alpha} = [b_{\alpha}^{-}, b_{\alpha}^{+}]$ seus respectivos α -cuts. Então, a soma de \tilde{A} com \tilde{B} , $\tilde{A} + \tilde{B}$ é um número *fuzzy* com α -cuts definido como:

$$C_{\alpha} = (A + B)_{\alpha} = [a_{\alpha}^{-} + b_{\alpha}^{-}, a_{\alpha}^{+} + b_{\alpha}^{+}] = [c_{\alpha}^{-}, c_{\alpha}^{+}] \quad (4.8)$$

Se dois números *fuzzy* são considerados com as funções de pertinência como: $\mu_A(x) = \mu_A(x; a_1, b_1, c_1)$, e $\mu_B(x) = \mu_B(x; a_2, b_2, c_2)$ podemos generalizar a equação da função de pertinência da soma como na equação (4.9):

$$\mu_{A+B}(x) = \mu_{A+B}(x; a_1 + a_2, b_1 + b_2, c_1 + c_2) \quad (4.9)$$

Semelhantemente, a subtração de \tilde{A} com \tilde{B} , $\tilde{A} - \tilde{B}$ é um número *fuzzy* com os α -cuts definidos em (4.6) e (4.7), como:

$$(A - B)_{\alpha} = [\text{mín}(a_{\alpha}^{-} - b_{\alpha}^{-}, a_{\alpha}^{+} - b_{\alpha}^{+}), \text{máx}(a_{\alpha}^{-} - b_{\alpha}^{-}, a_{\alpha}^{+} - b_{\alpha}^{+})] = [c_{\alpha}^{-}, c_{\alpha}^{+}] \quad (4.10)$$

Com o objetivo de generalizar a função de pertinência da subtração como foi feito com a soma, vamos supor que o número *fuzzy* \tilde{A} tem a seguinte função de pertinência

$$\mu_A(x) = \mu_A(x; 0, 0, 0)$$

diante disso o número *fuzzy* $\tilde{A} - \tilde{B}$ será dado por

$$(A - B)_\alpha = [\text{mín}(-b_\alpha^-, -b_\alpha^+), \text{máx}(-b_\alpha^-, -b_\alpha^+)] \quad (4.11)$$

$$-B_\alpha = (-1) * B_\alpha = [-b_\alpha^+, -b_\alpha^-] \quad (4.12)$$

A função de pertinência do α -cut é estabelecida assim por:

$$\mu_{(-1)B}(x) = \mu_{(-1)B}(x; -c_2, -b_2, -a_2) \quad (4.13)$$

Se o número *fuzzy* \tilde{B} for somado ao seu oposto definido em (4.13) obtém-se:

$$\mu_{B+(-1)B}(x) = \mu_{B+(-1)B}(x; a_2 - c_2, 0, c_2 - a_2) \quad (4.14)$$

Pelo resultado obtido de (4.14), pode-se encontrar uma fórmula genérica para cálculo de subtração entre dois números *fuzzy*.

$$\mu_{A+(-1)B}(x) = \mu_{A+(-1)B}(x; a_1 - c_2, b_1 - b_2, c_1 - a_2) \quad (4.15)$$

Com isso temos duas equações diferentes para a subtração de dois números *fuzzy* (ver equações. (4.10) e (4.15)), as quais apresentam resultados diferentes e, conforme o trabalho apresentado [8], a escolha de qual equação utilizar deve ser avaliada caso a caso.

Segue um exemplo numérico utilizando as duas equações (equações (4.10) e (4.15)) para realização da operação de subtração com o objetivo de demonstrar como estas produzem resultados distintos para os mesmos números de entrada.

Suponha os dois números *fuzzy* \tilde{A} e \tilde{B} com as funções de pertinência apresentadas a seguir.

$$\mu_A(x) = \mu_A(x; -1, 0, 1) \quad (4.16)$$

$$\mu_B(x) = \mu_A(x; -1, 1, 3) \quad (4.17)$$

Para $\alpha \in [0, 1]$, os α -cuts de \tilde{A} e \tilde{B} de acordo com (4.6) e (4.7) são:

$$A_\alpha = [\alpha - 1, 1 - \alpha], \quad B_\alpha = [2\alpha - 1, 3 - 2\alpha] \quad (4.18)$$

Logo, a subtração de \tilde{A} e \tilde{B} de acordo com a equação (4.10):

$$(A - B)_\alpha = [\alpha - 2, -\alpha] \quad (4.19)$$

$$\mu_{A-B}(x) = \mu_{A-B}(x; -2, -1, 0) \quad (4.20)$$

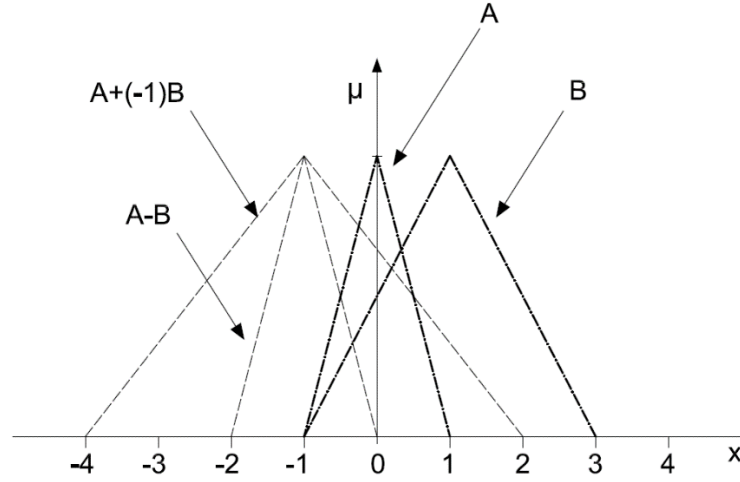
Por outro lado, utilizando a equação (4.15) para a mesma subtração obtêm-se:

$$\mu_{A+(-1)B}(x) = \mu_{A+(-1)B}(x; -1 - 3, 0 - 1, 1 + 1) \quad (4.21)$$

$$\mu_{A+(-1)B}(x) = \mu_{A+(-1)B}(x; -4, -1, 2) \quad (4.22)$$

Claramente podemos observar que, após utilizar as equações (4.10) e (4.15) para subtrair dois números *fuzzy* mostrados em (4.16) e (4.17), os resultados obtidos (ver eqs. (4.20) e (4.22)) são distintos. O valor central do triângulo se manteve nos dois casos, mas a base dos triângulos se diferencia, onde no caso $\tilde{A} + (-1)\tilde{B}$ a base é maior, representando um resultado com maior incerteza como pode ser observado na Figura 4.2.

Figura 4.2 – Soma números *fuzzy* triangulares



Fonte: [8].

Segundo [8], a equação (4.15) é mais utilizada para a subtração de dois números *fuzzy*, porém para o cálculo do fluxo de carga *fuzzy* a equação (4.10) mostrou-se mais adequada.

4.2.3 Multiplicação

Foi necessária a definição de uma nova função de multiplicação para ser utilizada nos cálculos dos fluxos, porque a definida por Zadeh em [11] não estava proporcionando os resultados esperados.

Como na matemática *fuzzy* deve-se sempre escolher as melhores funções e operações, em função do tipo de aplicação com o qual se está trabalhando, definiu-se nas seguintes equações [9].

$$A(m_A, \alpha_A) = X \otimes Y \quad (4.23)$$

$$m_A = m_X * m_Y \quad (4.24)$$

$$\alpha_A = \alpha_{ord}(2) \quad (4.25)$$

Em que,

$\alpha_{ord}(2)$ = é o segundo elemento do vetor

m_A = é o valor central do triângulo (número *fuzzy* triangular)

α_A = largura da base do triângulo (número *fuzzy* triangular)

$$\alpha_{ord} = str(\begin{array}{l} |m_A - [(m_X - \alpha_X) * (m_Y - \alpha_Y)]|, \\ |m_A - [(m_X - \alpha_X) * (m_Y + \alpha_Y)]|, \\ |m_A - [(m_X + \alpha_X) * (m_Y - \alpha_Y)]|, \\ |m_A - [(m_X + \alpha_X) * (m_Y + \alpha_Y)]| \end{array}) \quad (4.26)$$

e *str* é uma rotina que coloca os elementos em ordem crescente [9].

4.2.4 Divisão

A equação (4.27) define a divisão de dois números *fuzzy* triangulares cujas as funções de pertinência são $\mu_A(x) = \mu_A(x; a_1, a_2, a_3)$ e $\mu_B(x) = \mu_B(x; b_1, b_2, b_3)$ respectivamente.

$$\mu_{A/B} = (a_1, a_2, a_3)/(b_1, b_2, b_3) = (a_1/b_1, a_2/b_2, a_3/b_3) \quad (4.27)$$

4.2.5 Seno e Cosseno

As funções seno e cosseno estão explícitas nas diferentes formulações do problema de fluxo de potência. Caso fossem utilizadas as funções seno e cosseno convencionais nos cálculos *fuzzy*, os resultados obtidos talvez não representariam a natureza inerente das variáveis envolvidas, e assim sendo, estabeleceu-se neste trabalho uma formulação matemática para efetuar o cálculo destas operações de forma nebulosa (ressalta-se que estes cálculos são uma aproximação de um seno ou cosseno *fuzzy*) [9].

Para a função seno, especificam-se as seguintes relações aritméticas:

$$\sin fuzzy(m_\theta, \alpha_\theta) = (m_{\sin \theta}, \alpha_{\sin \theta}) \quad (4.28)$$

$$m_{\sin \theta} = (\sin(m_{\theta} - \alpha_{\theta}) + \sin(m_{\theta} + \alpha_{\theta}))/2 \quad (4.29)$$

$$\alpha_{\sin \theta} = (|(|m_{\sin \theta}| - |\sin(m_{\theta} - \alpha_{\theta})|)| + |(|m_{\sin \theta}| + |\sin(m_{\theta} + \alpha_{\theta})|)|)/2 \quad (4.30)$$

Em que,

m_{θ} = é o valor central do ângulo *fuzzy* triangular;

α_{θ} = largura da base do ângulo *fuzzy* triangular;

$m_{\sin \theta}$ = seno do valor central do ângulo *fuzzy* triangular;

$\alpha_{\sin \theta}$ = seno da base do ângulo *fuzzy* triangular.

Da mesma forma, tem-se as seguintes relações matemáticas para a função cosseno:

$$\cos \text{fuzzy}(m_{\theta}, \alpha_{\theta}) = (m_{\cos \theta}, \alpha_{\cos \theta}) \quad (4.31)$$

$$m_{\cos \theta} = (\cos(m_{\theta} - \alpha_{\theta}) + \cos(m_{\theta} + \alpha_{\theta}))/2 \quad (4.32)$$

$$\alpha_{\cos \theta} = (|(|m_{\cos \theta}| - |\cos(m_{\theta} - \alpha_{\theta})|)| + |(|m_{\cos \theta}| + |\cos(m_{\theta} + \alpha_{\theta})|)|)/2 \quad (4.33)$$

Em que,

m_{θ} = é o valor central do ângulo *fuzzy* triangular

α_{θ} = largura da base do ângulo *fuzzy* triangular

$m_{\cos \theta}$ = cosseno do valor central do ângulo *fuzzy* triangular

$\alpha_{\cos \theta}$ = cosseno da base do ângulo *fuzzy* triangular

Apesar de ser muito aplicada em diversas áreas do conhecimento, a aritmética *fuzzy* tradicional pode apresentar grandes desvantagens. Isso porque algumas regras válidas para operações com números reais nem sempre são válidas para operações com intervalos ou números *fuzzy*. Portanto, deve-se ter cuidado ao realizar tais operações [12].

As operações aritméticas com intervalos *fuzzy* seguem as propriedades associativa e comutativa, para a multiplicação e a adição. Assim, para três intervalos, A_{α} , B_{α} e C_{α} , de acordo com [12] tem-se que:

Associatividade:

$$A_\alpha + (B_\alpha + C_\alpha) = (A_\alpha + B_\alpha) + C_\alpha \quad (4.34)$$

$$A_\alpha \cdot (B_\alpha \cdot C_\alpha) = (A_\alpha \cdot B_\alpha) \cdot C_\alpha \quad (4.35)$$

Comutatividade:

$$A_\alpha + B_\alpha = B_\alpha + A_\alpha \quad (4.36)$$

$$A_\alpha \cdot B_\alpha = B_\alpha \cdot A_\alpha \quad (4.37)$$

No entanto, o mesmo não é válido para a propriedade distributiva. Na verdade, os intervalos seguem uma subclasse especial dessa propriedade, que é conhecida como propriedade subdistributiva [12]. Dessa forma, tem-se que:

Subdistributividade:

Se $b \cdot c \geq 0$ para $\forall b \in B_\alpha$ e $\forall c \in C_\alpha$ então:

$$A_\alpha \cdot (B_\alpha + C_\alpha) \subset A_\alpha \cdot B_\alpha + A_\alpha \cdot C_\alpha \quad (4.38)$$

Como exemplo para a aplicação da propriedade subdistributiva, considere $A_\alpha=[2,3]$, $B_\alpha=[-1,-2]$, $C_\alpha=[2,4]$:

$$A_\alpha \cdot (B_\alpha + C_\alpha) = [2,3] \cdot ([-1,-2] + [2,4]) = [2,3] \cdot [1,2] = [2,6] \quad (4.39)$$

$$\begin{aligned} A_\alpha \cdot B_\alpha + A_\alpha \cdot C_\alpha &= [2,3] \cdot [-1,-2] + [2,3] \cdot [2,4] = [-6,-2] + [4,12] \\ &= [-2,10] \end{aligned} \quad (4.40)$$

Portanto, $[2,6] \neq [-2,10]$, mas $[2,6] \subset [-2,10]$

Verifica-se que, de acordo com a propriedade subdistributiva, uma grande desvantagem da aplicação da aritmética *fuzzy* tradicional é a obtenção de resultados diferentes para o mesmo problema dependendo do procedimento de solução adotado [12].

Como outro exemplo, considere a seguinte equação:

$$f(\tilde{A}) = 2 \cdot \tilde{A} - \tilde{A}^2 \quad (4.41)$$

Resolvendo essa expressão para o número *fuzzy* triangular $\tilde{A} = [1 \ 2 \ 3]$, obtem-se:

$$f(\tilde{A}) = 2 \cdot [1,2,3] - [1,2,3] \cdot [1,2,3] = [-3,0,3] \quad (4.42)$$

$$f(\tilde{A}) = [-3,0,3] \quad (4.43)$$

Entretanto a equação (4.41) também pode ser reescrita como:

$$f(\tilde{A}) = \tilde{A} \cdot (2 - \tilde{A}) \quad (4.44)$$

E resolvendo para o mesmo número *fuzzy* \tilde{A} , temos:

$$f(\tilde{A}) = [-1,0,1] \quad (4.45)$$

Logo, como podemos observar os resultados são diferentes.

O problema descrito nos dois exemplos anteriores ocorre porque a aritmética *fuzzy* tradicional realiza cada operação aritmética entre intervalos e números *fuzzy*, considerando que os operandos são completamente independentes. A realidade, entretanto, não obedece a essa hipótese na maioria dos casos [12] .

Outra dificuldade para a aplicação da aritmética *fuzzy* tradicional se encontra em situações em que existe a necessidade de se realizar operações consecutivas com números *fuzzy*. Os erros associados podem ser significativos e os resultados tornam-se incompatíveis com a realidade, pois a incerteza aumenta consideravelmente [12].

Para ilustrar este efeito, considere um processo iterativo de adição entre o número *fuzzy* triangular e $\tilde{A} = [0,1,2]$ e o número 1, que pode ser representado por $\tilde{B} = [1,1,1]$. Seguindo a fórmula de adição entre dois números *fuzzy* triangulares, obtêm-se:

$$\tilde{C} = \tilde{A} + \tilde{B} = [1,2,3] \quad (4.46)$$

$$\tilde{D} = \tilde{A} + \tilde{C} = [1,3,5] \quad (4.47)$$

$$\tilde{E} = \tilde{A} + \tilde{D} = [1,4,7] \quad (4.48)$$

$$\tilde{F} = \tilde{A} + \tilde{E} = [1,5,9] \quad (4.49)$$

: : :

Como pode ser observado, as incertezas resultantes aumentam rapidamente enquanto os valores extremos máximos aumentam a cada passo, os valores mínimos permanecem fixos. Da mesma forma como ocorrem erros em processamentos iterativos com números decimais, o mesmo acontece com os números *fuzzy* e com maior intensidade [12].

Neste trabalho, as operações aritméticas apresentadas neste capítulo serão utilizadas como base de cálculo na resolução dos diferentes modelos matemáticos para o problema de fluxo de potência. É importante ressaltar a dependência entre os resultados encontrados na solução de fluxo de carga *fuzzy* e o método escolhido para cada operação aritmética *fuzzy* a ser utilizado. Deve existir uma preocupação em aliar os resultados com o esperado fisicamente. Portanto, se após análise do especialista o resultado não se mostrar viável fisicamente, indo contra as leis de Kirchhoff por exemplo, deve-se considerar a alteração no método utilizado em cada operação, de forma a se aproximar do esperado.

Capítulo 5

Metodologias para a solução do problema de Fluxo de Carga com variáveis fuzzy

5.1 Método Linearizado (PFLF)

5.1.1 Formulação

Para reduzir os efeitos da subtração dos números *fuzzy* no resultado do fluxo de carga linearizado *fuzzy*, é proposto em [8] uma alteração no algoritmo do fluxo linearizado convencional, de forma a subtração ser efetuada somente no final do processo. Para a devida comparação dos métodos, inicialmente, será apresentado a metodologia de cálculo do fluxo de carga linearizado convencional.

Como as subtrações podem produzir resultados não desejados, é proposto eliminar a dependência entre o cálculo do fluxo das linhas e os ângulos das tensões nas barras. Assim, o fluxo linearizado *fuzzy* é calculado diretamente da potência gerada ou demandada. Ressaltando que o cálculo das subtrações será realizado através da equação (4.10).

Para o cálculo dos ângulos *fuzzy* utilizam-se as seguintes equações:

$$[\tilde{\theta}g] = [B^{-1}][\tilde{P}g] = [X\tilde{P}g] \quad (5.1)$$

$$[\tilde{\theta}d] = [B^{-1}][\tilde{P}d] = [X\tilde{P}d] \quad (5.2)$$

$$[\tilde{\theta}] = [\tilde{\theta}g] - [\tilde{\theta}d] \quad (5.3)$$

Em que,

$\tilde{\theta}g$ = ângulos da tensão *fuzzy* referente a potência gerada em cada barra;

$\tilde{\theta}d$ = ângulos da tensão *fuzzy* referente a potência de carga em cada barra;

$\tilde{P}g$ = distribuições de possibilidades da potência ativa gerada em cada barra;

$\tilde{P}d$ = distribuições de possibilidades da potência de carga em cada barra;

B^{-1} = matriz tipo admitância nodal e cujos elementos podem ser obtidos através das equações (3.28) e (3.39);

$\tilde{\theta}$ = distribuições de possibilidades dos ângulos de tensão em cada barra;

X = Substitui a matriz B^{-1} para auxiliar na formação da equação (5.4).

Para calcular o fluxo de potência ativa *fuzzy* através dos ramos:

$$\tilde{f}pq = \frac{1}{x_{pq}} \left[\sum_{\forall j} (X_{pj} - X_{qj}) \tilde{P}_{gj} + \sum_{\forall j} (X_{qj} - X_{pj}) \tilde{P}_{dj} \right] \quad (5.4)$$

Em que,

j = barras do sistema;

$\tilde{f}pq$ = distribuições de possibilidades do fluxo ativo entre as barras p e q ;

x_{pq} = reatância entre as barras p e q ;

X_{pj} e X_{qj} = coeficientes referentes a matriz $[B^{-1}]$;

\tilde{P}_{gj} = distribuições de possibilidades da potência ativa gerada em cada barra;

\tilde{P}_{dj} = distribuições de possibilidades da potência ativa de carga em cada barra.

Esta proposta exige a operação de subtração nas equações (5.3) e (5.4). Na equação (5.4), a subtração ocorrerá caso o coeficiente $X_{pj} - X_{qj}$ resultar em número negativo. Este procedimento atrasa a subtração para o fim do processo de solução do fluxo de carga, utilizando a

equação (4.10) e aplicando a teoria de α -cuts.

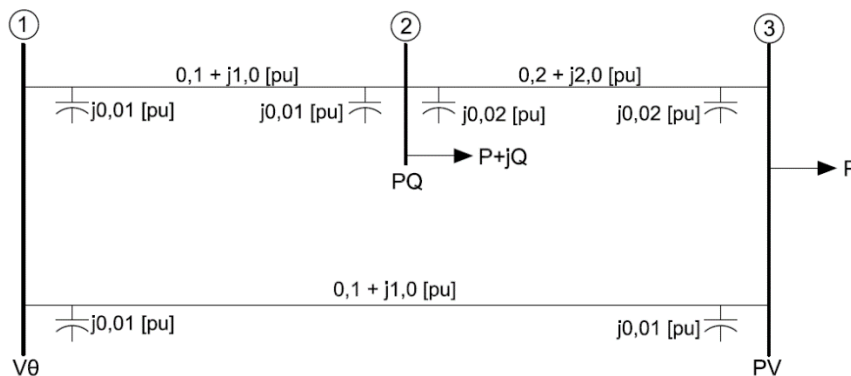
O algoritmo desta metodologia foi implementado utilizando-se Matlab®R2020, sem uso de toolboxes.

5.1.2 Exemplo ilustrativo

Para permitir melhor visualização da aplicação de cada metodologia será apresentada a resolução de um sistema de 3 (três) barras e 3 (ramos) como o mostrado na figura a seguir. Os dados para este sistema são apresentados nas Tabela 5.1 e Tabela 5.2.

Observe dos dados apresentados na Tabela 5.1 que foram assumidas distribuições de possibilidades triangulares para as demandas de potência nas barras 2 e 3. Essas distribuições de potências foram definidas utilizando 5% de variação em relação ao valor de potência nominal (valor central) para a barra 2 e variação de 7% para a barra 3.

Figura 5.1 – Sistema 3 barras



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 5.1 – Dados de barra do sistema 3 barras

Barra	Tipo	P (MW)			Q (Mvar)			V _{inicial} (p.u.)	θ _{inicial} (graus)
		a	b	c	a	b	c		
1	Vθ	-	-	-	-	-	-	1,0	0,0
2	PQ	4,65	5,00	5,35	1,86	2,00	2,14	1,0	0,0
3	PV	13,95	15,0	16,05	-	-	-	1,0	0,0

Tabela 5.2 – Dados dos ramos do sistema 3 barras

Ramo	$r[\text{p.u.}]$	$X[\text{p.u.}]$	$b^{sh}[\text{p.u.}]$
1-2	0,1	1,0	0,01
2-3	0,2	2,0	0,02
1-3	0,1	1,0	0,01

Inicialmente calculamos a matriz $[B]$ inversa, desconsiderando a barra de referência $V\theta$:

$$[B']^{-1} = \begin{bmatrix} 0,75 & 0,25 \\ 0,25 & 0,75 \end{bmatrix}$$

Utilizando esta matriz, o vetor das potências ativas P e operações básicas da aritmética *fuzzy*, obtém-se o vetor θ :

$$[\tilde{\theta}] = [B']^{-1}[\tilde{P}] \quad (5.5)$$

$$\tilde{\theta} = \begin{bmatrix} 0,75 & 0,25 \\ 0,25 & 0,75 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0,0465 & 0,0500 & 0,0535 \\ 0,1395 & 0,1500 & 0,1605 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{\theta} = \begin{bmatrix} -0,0698 & -0,0750 & -0,0803 \\ -0,1163 & -0,1250 & -0,1338 \end{bmatrix}$$

Tabela 5.3 – Ângulos de fase das tensões nas barras

Barra	Ângulos [°]		
	a	b	c
2	-4,000	-4,297	-4,601
3	-6,663	-7,162	-7,666

Por fim, resolvemos a equação (5.4) para encontrarmos os fluxos de potência ativa pelos ramos:

Tabela 5.4 – Fluxo de potência ativa nos ramos

Ramo	Potência Ativa [MW]		
	a	b	c
1-2	6,98	7,50	8,03
2-3	2,32	2,50	2,68
1-3	11,63	12,50	13,38

Pode-se concluir que o modelo linearizado do fluxo de potência com entradas *fuzzy* é

uma aplicação simples com poucas manipulações aritméticas e que pode, de certa forma, fornecer informações valiosas quando considerado o planejamento dos sistemas sob a presença de incertezas nas demandas futuras previstas. Quando se fizer necessário análises mais detalhadas, onde a magnitude da tensão nas barras e/ou os fluxos de potência reativa sejam importantes para análise, deve-se considerar a viabilidade do uso dos métodos apresentados a seguir.

5.2 Método de Newton-Raphson – Aproximação Analítica (PFNRF)

Diante das mais variadas dificuldades em obter resultados alinhados com o esperado fisicamente nos cálculos *fuzzy*, em [4] o autor propôs a solução do problema do fluxo de carga *fuzzy* CA visando refletir as imprecisões dos dados de entrada sobre os ângulos e módulos das tensões nodais, fluxos de potência, perdas de potência e correntes. Apesar de em [4] ser utilizadas funções de pertinência trapezoidais para representar as variáveis *fuzzy*, neste trabalho utilizamos funções de pertinência triangular, pela praticidade na representação da incerteza em relação aos valores utilizados no fluxo de carga tradicional no âmbito das concessionárias. Portanto, o valor central do triângulo é o valor especificado pelo especialista, ou valor nominal, e a partir disto é adotado um valor percentual de imprecisão de $x\%$ para cima e para baixo do valor nominal para determinar a base do triângulo.

5.2.1 Formulação

As distribuições de possibilidade do modelo CA são determinadas utilizando uma técnica incremental, partindo de um fluxo de potência determinístico CA, onde as injeções de potência ativa e reativa especificadas correspondem ao ponto médio de suas respectivas distribuições de possibilidade. Assim, são avaliados os valores determinísticos de todas as grandezas do problema e, os valores das distribuições de possibilidade finais são obtidos pela superposição desses valores determinísticos com as distribuições de possibilidade de seus incrementos [12].

Neste trabalho, algumas mudanças ao método proposto em [4] foram implementadas, mais especificamente no método de cálculo de perdas, com o objetivo de descrever melhor a formulação e na tentativa de obter resultados coerentes com o problema de fluxo de carga. A seguir, as principais etapas do método desenvolvido serão explicadas.

Inicialmente, a partir das distribuições de possibilidade das potências de cargas e gerações determina-se as distribuições de possibilidade das injeções de potência ativa e reativa para cada barra. Para cada barra j , tem-se:

$$\tilde{P}_j = \tilde{P}_{Gj} - \tilde{P}_{Lj} \quad (5.6)$$

$$\tilde{Q}_j = \tilde{Q}_{Gj} - \tilde{Q}_{Lj} \quad (5.7)$$

Em que:

\tilde{P}_{Gj} = distribuição de possibilidade das gerações ativa da barra j ;

\tilde{Q}_{Gj} = distribuição de possibilidade das gerações reativa da barra j ;

\tilde{P}_{Lj} = distribuição de possibilidade das cargas ativa da barra j ;

\tilde{Q}_{Lj} = distribuição de possibilidade das cargas reativa da barra j .

Logo, pode-se calcular as distribuições de possibilidade dos desvios de injeções de potência em relação aos seus valores determinísticos aqui apresentados como P_{dj} e Q_{dj} .

$$\Delta\tilde{P}_j = \tilde{P}_j - P_{dj} \quad (5.8)$$

$$\Delta\tilde{Q}_j = \tilde{Q}_j - Q_{dj} \quad (5.9)$$

Então, utilizando-se a matriz jacobiana avaliada na última iteração do fluxo de potência Newton-Raphson determinístico, determinamos as distribuições de possibilidade dos incrementos de ângulos de tensão e módulo de tensão.

$$\begin{bmatrix} \Delta\tilde{\theta} \\ \Delta\tilde{V} \end{bmatrix} = [J]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\tilde{P} \\ \Delta\tilde{Q} \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

As distribuições de possibilidade dos ângulos e módulos de tensão, para uma barra j , são o resultado da soma dos valores determinísticos e das distribuições calculadas na equação (5.10).

$$\tilde{\theta}_j = \theta_{dj} - \Delta\tilde{\theta}_j \quad (5.11)$$

$$\tilde{V}_j = \tilde{V}_{dj} - \Delta \tilde{V}_j \quad (5.12)$$

Observe que neste caso no fluxo de potência fuzzy, para a obtenção das distribuições de possibilidades para os módulos e ângulos das tensões nodais não é necessário realizar um processo iterativo. O processo iterativo é unicamente realizado na obtenção da solução do fluxo de carga determinístico.

Por outro lado, as distribuições de possibilidade dos incrementos de fluxos de potência ativa e reativa nas linhas são avaliadas considerando que estas variáveis são funções não lineares dos ângulos e módulos de tensão nas barras extremas. Por exemplo, para uma linha entre as barras k e m [12], tem-se que:

$$P_{km} = f_1(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \quad (5.13)$$

$$Q_{km} = f_2(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \quad (5.14)$$

Para determinação do fluxo de potência devem ser efetuadas linearizações das funções utilizadas nas equações (5.13) e (5.14), de acordo com as expansões em série de Taylor em torno dos valores médios associados [9].

Considerando os fluxos de potência dados por:

$$P_{km} = V_k^2 \cdot g_{km} - tap \cdot V_k \cdot V_m \cdot (g_{km} \cdot \cos(\theta_k - \theta_m) + b_{km} \cdot \sin(\theta_k - \theta_m)) \quad (5.15)$$

$$P_{mk} = V_m^2 \cdot g_{km} \cdot tap^2 - V_k \cdot V_m \cdot tap \cdot (g_{km} \cdot \cos(\theta_k - \theta_m) - b_{km} \cdot \sin(\theta_k - \theta_m)) \quad (5.16)$$

$$Q_{km} = -V_k^2 \cdot (b_{km} + b_{sh}) - tap \cdot V_k \cdot V_m \cdot (g_{km} \cdot \sin(\theta_k - \theta_m) - b_{km} \cdot \cos(\theta_k - \theta_m)) \quad (5.17)$$

$$Q_{mk} = -V_m^2 \cdot (b_{km} + b_{sh}) \cdot tap^2 + tap \cdot V_k \cdot V_m \cdot (g_{km} \cdot \sin(\theta_k - \theta_m) + b_{km} \cdot \cos(\theta_k - \theta_m)) \quad (5.18)$$

Visando uma expansão através da série de Taylor, tem-se que:

$$\frac{\delta P_{km}}{\delta V_k} = 2 \cdot g_{km} \cdot V_k - tap \cdot V_m (b_{km} \cdot \sin(\theta_k - \theta_m) + g_{km} \cdot \cos(\theta_k - \theta_m)) \quad (5.19)$$

$$\frac{\delta P_{km}}{\delta V_m} = -tap \cdot V_k (b_{km} \cdot \sin(\theta_k - \theta_m) + g_{km} \cdot \cos(\theta_k - \theta_m)) \quad (5.20)$$

$$\frac{\delta P_{km}}{\delta \theta_k} = -tap \cdot V_k \cdot V_m (b_{km} \cdot \cos(\theta_k - \theta_m) - g_{km} \cdot \sin(\theta_k - \theta_m)) \quad (5.21)$$

$$\frac{\delta P_{km}}{\delta \theta_m} = -tap \cdot V_k \cdot V_m (-b_{km} \cdot \cos(\theta_k - \theta_m) + g_{km} \cdot \sin(\theta_k - \theta_m)) \quad (5.22)$$

Utilizando os primeiros termos da série de Taylor pode-se efetuar a aproximação, de tal forma que os desvios ΔP_{km} podem ser expressos por:

$$\Delta \tilde{P}_{km} = \frac{\delta f_1}{\delta V_k (V_k=V_{dk})} \cdot \Delta \tilde{V}_k + \frac{\delta f_1}{\delta V_m (V_m=V_{dm})} \cdot \Delta \tilde{V}_m + \frac{\delta f_1}{\delta \theta_k (\theta_k=\theta_{dk})} \cdot \Delta \tilde{\theta}_k + \frac{\delta f_1}{\delta \theta_m (\theta_m=\theta_{dm})} \cdot \Delta \tilde{\theta}_m \quad (5.23)$$

Logo, é possível obter as distribuições de possibilidades finais dos fluxos de potência ativa através da equação:

$$\tilde{P}_{km} = P_{km}^m + \Delta \tilde{P}_{km} \quad (5.24)$$

em que,

\tilde{P}_{km} = distribuição de possibilidade para o fluxo de potência ativo no ramo km ;

P_{km}^m = ponto médio para o fluxo de potência ativo no ramo km , calculado com o fluxo determinístico;

$\Delta \tilde{P}_{km}$ = distribuições de possibilidades para os desvios do fluxo de potência ativo no ramo km , calculado através da equação (5.23).

Realizando a mesma analogia com a função da equação (5.14), obtém-se as distribuições para os fluxos de potência reativa.

Nesse sentido, pode-se também linearizar as equações de injeções de potência nas barras, i.e., encontrar as distribuições de possibilidades para potências geradas nas barras de referência e nas barras PV. Considerando as injeções de potência nas barras na forma generalizada como:

$$P_k = f_3(V_i, \dots, V_n, \theta_i, \dots, \theta_n) \quad (5.25)$$

$$Q_k = f_4(V_i, \dots, V_n, \theta_i, \dots, \theta_n) \quad (5.26)$$

Utilizando a expansão em séries de Taylor, temos para este caso que:

$$\Delta \tilde{P}_k = \frac{\delta f_3}{\delta V_i (V_i=V_{di})} \cdot \Delta \tilde{V}_i + \frac{\delta f_3}{\delta V_n (V_n=V_{dn})} \cdot \Delta \tilde{V}_n + \frac{\delta f_3}{\delta \theta_i (\theta_i=\theta_{di})} \cdot \Delta \tilde{\theta}_i + \frac{\delta f_3}{\delta \theta_n (\theta_n=\theta_{dn})} \cdot \Delta \tilde{\theta}_n \quad (5.27)$$

Uma análise similar é feita para a injeção de potência reativa.

Enfim, é possível encontrar as potências *fuzzy* geradas nas barras de referência e nas barras PV através das seguintes equações:

$$\tilde{P}_g = P_g^m + \Delta \tilde{P}_g \quad (5.28)$$

$$\tilde{Q}_g = Q_g^m + \Delta \tilde{Q}_g \quad (5.29)$$

Em [9] e [12] foram apresentadas discussões que apontam que a técnica utilizada, até agora, não é satisfatória para o cálculo das perdas nos ramos em que o valor do fluxo é pequeno ou naqueles que possam ter reversão do mesmo. Nestes casos, para o cálculo das perdas, os autores determinaram uma nova matriz (S), relacionada às sensibilidades identificadas no problema. Porém, neste trabalho, propõe-se a linearização das perdas ativas de potência assim como foi feito para os fluxos de potência nos ramos. Considerando que as perdas são dadas por:

$$P_{km}^{Perdas} = V_k^2 \cdot g_{km} + g_{km} \cdot V_m^2 \cdot tap_{km}^2 - 2 \cdot tap_{km}^2 \cdot V_k \cdot V_m \cdot g_{km} \cos(\theta_{km}) \quad (5.30)$$

E considerando-se que $P_{km}^{Perdas} = f_5$, temos:

$$\Delta \tilde{P}_{km}^{Perdas} = \frac{\delta f_5}{\delta V_i (V_i=V_{di})} \cdot \Delta \tilde{V}_i + \frac{\delta f_5}{\delta V_n (V_n=V_{dn})} \cdot \Delta \tilde{V}_n + \frac{\delta f_5}{\delta \theta_i (\theta_i=\theta_{di})} \cdot \Delta \tilde{\theta}_i + \frac{\delta f_5}{\delta \theta_n (\theta_n=\theta_{dn})} \cdot \Delta \tilde{\theta}_n \quad (5.31)$$

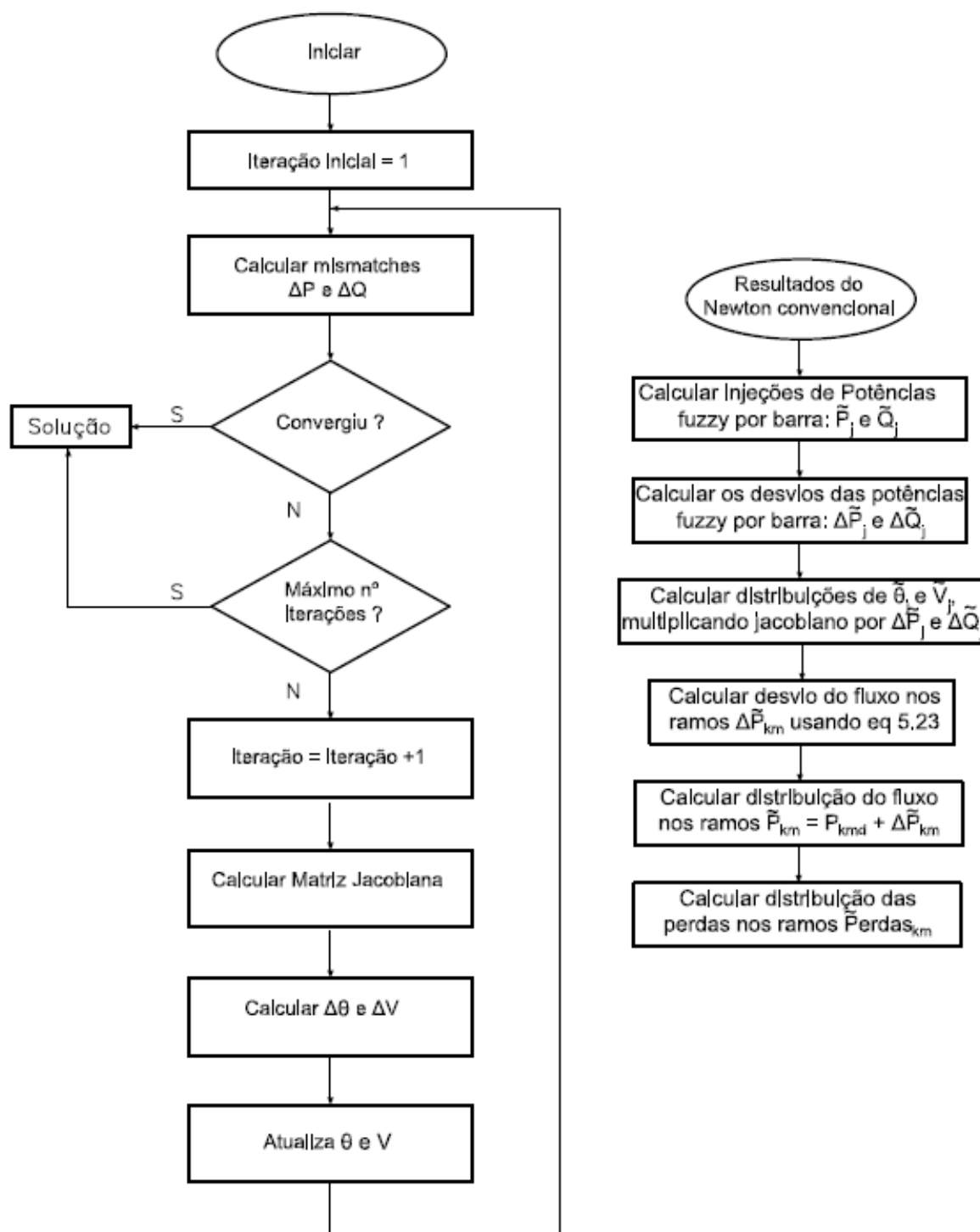
Logo, as distribuições de possibilidades das perdas podem ser expressas usando:

$$\tilde{P}_{km}^{Perdas} = P_{kmd}^{Perdas} + \Delta \tilde{P}_{km}^{Perdas} \quad (5.32)$$

Onde P_{kmd}^{Perdas} , é a perda ativa no ramo km , calculado pelo fluxo de carga determinístico.

O fluxograma da metodologia proposta para obter solução ao problema de fluxo de potência com variáveis *fuzzy* usando uma aproximação analítica baseada no método de Newton-Raphson é mostrado a seguir, sendo que o mesmo foi implementado utilizando-se a linguagem de programação Python 3.7.7.

Figura 5.2 – Fluxograma do método Newton-Raphson com aproximação analítica



Fonte: Elaborado pelo autor

Apesar de mais complexa que a anterior (seção 5.1), esta metodologia apresenta resultados mais completos para a solução do fluxo de carga *fuzzy*. Ao contrário do Linearizado, obtém-se como resultados as variáveis de estado (magnitude e ângulo de tensão nas barras) e

os fluxos nos ramos (ativo e reativo) além das perdas nos ramos. Pelo fato deste método não utilizar a aritmética *fuzzy* nas equações não é influenciado pelos sucessivos acréscimos de imprecisão que as operações *fuzzy* trariam aos resultados finais. Diante disto, tem sido aceito como referência para medição de efetividade de novos métodos.

5.2.2 Exemplo Ilustrativo

Como sistema ilustrativo será utilizado o mesmo sistema de 3 (três) barras apresentado na subseção 5.1.2 .

Inicialmente deve-se obter o estado do sistema resolvendo o fluxo de carga pela metodologia Newton-Raphson convencional para os valores médios das distribuições de possibilidades. Esses resultados são apresentados nas Tabela 5.5 e Tabela 5.6.

Tabela 5.5 – Resultados do PFNR convencional

Barra	V _d [pu]	θ _d [°]	P _{inj}	Q _{inj}	P _g	Q _g	P _L	Q _L
1	1,000	0,00	20,23	-0,34	20,23	-0,34	0,00	0,00
2	0,994	-4,38	-5,00	-2,00	0,00	0,00	5,00	2,00
3	0,980	-7,31	-15,00	-3,17	0,00	-3,17	15,00	0,00

Na Tabela 5.5, as injeções de potência ativa (P_{inj}) e as potências ativas geradas e demandadas (P_g e P_L, respectivamente) estão em MW. As injeções de potência reativa (Q_{inj}) e as potências reativas geradas e demandadas (Q_g e Q_L, respectivamente) estão em Mvar.

Tabela 5.6 – Fluxos nos ramos usando PFNR convencional

Ramo	Potência Ativa		Potência reativa		Perdas [MW]
	P _{km} [MW]	P _{mk} [MW]	Q _{km} [Mvar]	Q _{mk} [Mvar]	
1-2	7,60	-7,55	-0,88	-0,53	0,0578
2-3	2,55	-2,53	-1,47	-2,29	0,0136
1-3	12,63	-12,47	0,53	-0,88	0,1619

O próximo passo consiste no cálculo dos desvios das potências ativa e reativa com relação aos respectivos valores determinísticos:

$$[\Delta\tilde{Z}] = [\tilde{Z}] - [\tilde{Z}_d] \quad (5.33)$$

Tabela 5.7 – Desvios das potências [MW]

Barra	Desvio de potência ativa			Desvio de potência reativa		
	a	b	c	a	b	c
2	-3,50e-3	0	3,5e-3	-1,4e-3	0	1,4e-3
3	-1,05e-2	0	1,05e-2			

Lembrando que os pontos a, b e c, na Tabela 5.7, são os pontos necessários para formar a distribuição de possibilidade triangular que representa o desvio de potência *fuzzy*. Observe na Tabela 5.7, que não é calculado desvio de potência reativa na barra 3 pois esta é uma barra do tipo PV.

Então, calcula-se os desvios para magnitudes de tensão e ângulo de tensão nas barras utilizando-se a matriz jacobiana da última iteração, como segue:

$$[\Delta\tilde{X}] = [J]^{-1} - [\Delta\tilde{Z}] \quad (5.34)$$

$$[\tilde{X}] = [X_d] + [\Delta\tilde{X}] \quad (5.35)$$

A Jacobiana da última iteração do método de PFNR convencional, neste caso, corresponde a:

$$[J]^{-1} = \begin{bmatrix} 0,7661 & 0,2601 & -0,0389 \\ 0,2620 & 0,7880 & 0,0226 \\ 0,1013 & 0,0229 & 0,6953 \end{bmatrix} \quad (5.36)$$

Assim, com o auxílio das equações (5.34) e (5.35), obtém-se os desvios das variáveis de estado mostrados na Tabela 5.8, que permitem a atualização das variáveis como mostrado na Tabela 5.9.

Tabela 5.8 – Desvios para magnitudes e os ângulos das tensões nas barras

Barra	Desvio para os ângulos[rad]			Desvio para as magnitudes [p.u.]		
	a	b	c	a	b	c
2	-5,4675e-3	0,00	5,4675e-3	-1,5688e-3	0,00	1,5688e-3
3	-9,2236e-3	0,00	9,2236e-3			

Tabela 5.9 – Magnitudes e ângulos das tensões nas barras

Barra	Ângulos[rad]			Magnitudes [p.u.]		
	a	b	c	a	b	c
2	-0,0819	-0,0764	-0,0709	0,9925	0,9940	0,9956
3	-0,1368	-0,1276	-0,1184			

Tendo em mãos as distribuições de possibilidade das magnitudes de tensão e ângulos de fase das tensões nas barras, realiza-se os cálculos para obter as distribuições de possibilidades dos fluxos de potência nos ramos, utilizando o método de linearização em série de Taylor descrito na equação (5.23). Essas distribuições são mostradas na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Desvios para os fluxos de potência ativa e reativa

Ramo	Desvio para o fluxo de potência ativa [MW]			Desvio para o fluxo de potência reativa [Mvar]		
	a	b	c	a	b	c
1-2	-0,0054	0,00	0,0054	-0,0017	0,00	0,0017
2-3	-0,0072	0,00	0,0072	-0,0010	0,00	0,0010
1-3	-0,0090	0,00	0,0090	-0,0002	0,00	0,0002

Somando-se os desvios da Tabela 5.10 com os resultados determinísticos encontrados, apresentados na Tabela 5.6, obtemos a distribuição de possibilidade dos fluxos de potência nos ramos:

Tabela 5.11 – Fluxos de potência ativa e reativa nos ramos

Ramo	Fluxos de potência ativa [MW]			Fluxos de potência reativa [Mvar]		
	a	b	c	a	b	c
1-2	7,058	7,6029	8,1472	-1,0460	-0,8774	-0,7088
2-3	1,8221	2,5451	3,2680	-1,5737	-1,4674	-1,3612
1-3	11,7313	12,6303	13,5294	0,5092	0,5344	0,5596

Por fim, o cálculo da perdas nos ramos poderão ser calculados utilizando a mesma metodologia anteriormente utilizada para os fluxos de potência nos ramos, utilizando-se da linearização da equação (5.3) e somando-se os desvios às perdas determinísticas apresentadas na Tabela 5.6. Os desvios obtidos para as perdas são apresentados na Tabela 5.12 e as distribuições de possibilidades para as perdas são mostradas na Tabela 5.13.

Tabela 5.12 – Desvios para as perdas ativas [MW]

Ramo	a	b	c
1-2	-8,3116e-5	0,00	8,3116e-5
2-3	-7,4946e-5	0,00	7,4946e-5
1-3	-2,2788e-4	0,00	2,2788e-4

Tabela 5.13 – Perdas ativas [MW] nos ramos

Ramo	Perdas de potência ativa		
	a	b	c
1-2	0,0495	0,0578	0,0661
2-3	0,0061	0,01363	0,0211
1-3	0,1391	0,1618	0,1846

5.3 Sistema de Inferência *Fuzzy* (PFDFC)

O trabalho [6] introduz o uso de um sistema de inferência *fuzzy* na solução do problema de fluxo de carga. Ele se refere a este sistema como controlador *fuzzy* (FLC). Este FLC utilizará uma base de regras para o cálculo das correções dos módulos de tensão e ângulos para cada nó do sistema. Sendo que, as injeções de potência do sistema e as cargas estão representadas como valores *crisp*, que são valores que pertencem ou não pertencem a um conjunto, ou seja, não há grau de incerteza envolvido.

5.3.1 Formulação

A solução apresentada é baseada no método Desacoplado, o qual envolve a solução das equações (3.34) e (3.35) e as reescreve no formato exibido na equação (5.37), mostrando que a correção do vetor de estado ΔX em cada nó do sistema é diretamente proporcional ao vetor ΔF que corresponde ao vetor de *mismatches* de potência.

$$\Delta F = B * \Delta X \quad (5.37)$$

Em que,

$$\Delta F = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (5.38)$$

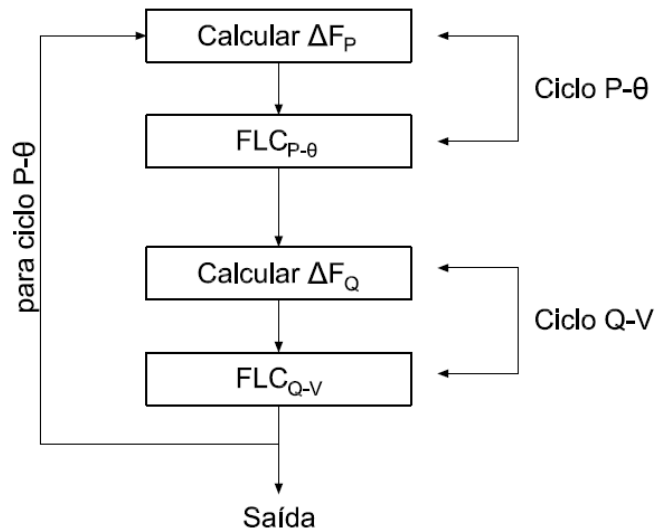
$$\Delta X = \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (5.39)$$

Como mencionado anteriormente, o algoritmo proposto é baseado nas equações de solução do problema do fluxo de carga desacoplado rápido, mas a atualização iterativa do vetor de estado do sistema será realizada via sistema de inferência *fuzzy* em vez de usar a abordagem clássica do fluxo de carga. Isso é realizado utilizando-se [6]:

$$\Delta X = \text{fuz}(\Delta F) \quad (5.40)$$

O algoritmo proposto é ilustrado na figura 5.3. Onde os *mismatches* ΔF_P e o ΔF_Q são calculados através da Equação (3.5), e introduzidos no sistema de inferência *fuzzy* que aqui será chamado de controlador lógico *fuzzy* ciclo P- θ (FLC_{P- θ}) e controlador lógico *fuzzy* ciclo Q-V (FLC_{Q-V}) respectivamente. Os FLCs geram as correções do vetor de estado ΔX conforme equação (5.40), a saber a correção do vetor dos ângulos de tensão $\Delta\theta$ para o ciclo P- θ e a correção da magnitude de tensão ΔV para o ciclo Q-V.

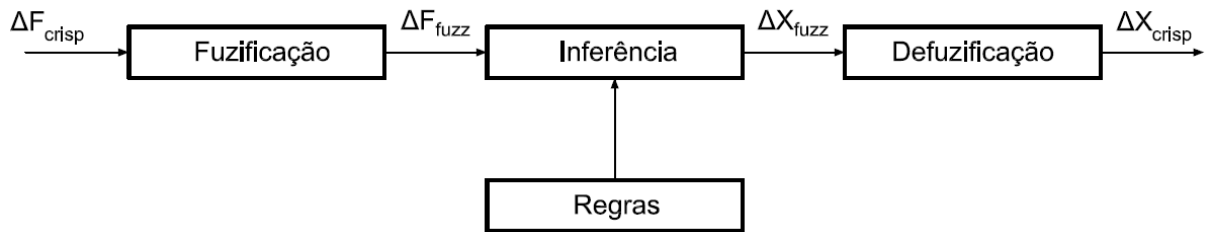
Figura 5.3 – Algoritmo do fluxo de carga com FLCs



Fonte: [6].

Na figura 5.4, podemos observar com mais detalhes as partes componentes do sistema de inferência *fuzzy* utilizada no algoritmo de solução do fluxo de carga.

Figura 5.4 – Estrutura do sistema de inferência *fuzzy* (FLC)



Fonte: [6]

As entradas são transformadas em conjuntos *fuzzy* utilizando sete variáveis linguísticas:

LN = Muito negativo

MN = Médio negativo

SN = Pouco negativo

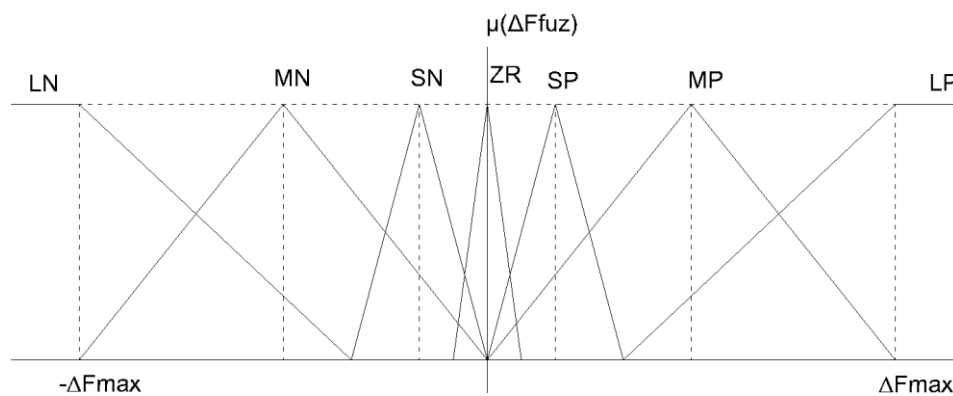
ZR = Zero

SP = Pouco positivo

MP = Médio positivo

LP = Muito positivo

Figura 5.5 – Distribuição das funções de pertinência



Fonte: Elaborado pelo autor

O máximo *mismatch* de potência (ΔF_{max}) determina o *range* da escala que transfere o sinal de entrada no universo de discurso correspondente em cada iteração. Sendo que ΔF_{max} é determinado pelo maior valor de ΔP ou ΔQ encontrado nas barras do sistema para a iteração. O sinal de entrada é transformado em um conjunto *fuzzy* com sete variáveis linguísticas que são

representadas em funções triangulares, conforme figura 5.5, onde os três pontos principais (esquerda inferior, superior e direita inferior) de cada função triangular são determinados conforme definido a seguir:

$$\text{LN: } [-\infty, -\Delta F_{\max}, -\Delta F_{\max}/3]$$

$$\text{MN: } [-\Delta F_{\max}, -\Delta F_{\max}/2, 0]$$

$$\text{SN: } [-\Delta F_{\max}/3, -\Delta F_{\max}/6, 0]$$

$$\text{ZR: } [-\Delta F_{\max}/12, 0, \Delta F_{\max}/12]$$

$$\text{SP: } [0, \Delta F_{\max}/6, \Delta F_{\max}/3]$$

$$\text{MP: } [0, \Delta F_{\max}/2, \Delta F_{\max}]$$

$$\text{LP: } [\Delta F_{\max}/3, \Delta F_{\max}, +\infty]$$

A seguir são apresentadas as regras *fuzzy* utilizadas no controlador. Estas regras *fuzzy* são consistentes com a observação que o vetor de estado ΔX é diretamente proporcional ao vetor de potência ΔF em cada iteração.

Regra 1: se ΔF_{fuz} é **muito** negativo então ΔX_{fuz} é **muito** negativo

Regra 2: se ΔF_{fuz} é **médio** negativo então ΔX_{fuz} é **médio** negativo

Regra 3: se ΔF_{fuz} é **pouco** negativo então ΔX_{fuz} é **pouco** negativo

Regra 4: se ΔF_{fuz} é **zero** então ΔX_{fuz} é **zero**

Regra 5: se ΔF_{fuz} é **pouco** positivo então ΔX_{fuz} é **pouco** positivo

Regra 6: se ΔF_{fuz} é **médio** positivo então ΔX_{fuz} é **médio** positivo

Regra 7: se ΔF_{fuz} é **muito** positivo então ΔX_{fuz} é **muito** positivo

O sinal *fuzzy* ΔF_{fuz} é enviado para o bloco de inferência que gera a saída *fuzzy* ΔX_{fuz} baseada nas regras anteriormente apresentadas. A saída *fuzzy* ΔX_{fuz} é enviada para o bloco de “defuzzificação”.

O máximo ΔX_{\max} que irá corresponder ao universo de discurso da saída do controlador para cada iteração é calculada através de equações originárias da diagonal principal da matriz

Jacobiana conforme equações (5.41) e (5.42).

$$\frac{\Delta F_{max,I}}{\Delta X_{max}} = \frac{dF_I}{dX_I} \quad (5.41)$$

$$\Delta X_{max} = \left(\frac{dF_I}{dX_I} \right)^{-1} \Delta F_{max,I} \quad (5.42)$$

Lembrando que a matriz jacobiana para o problema de fluxo de carga utilizando o método de Newton-Raphson tem o formato mostrado em (3.15).

No método desacoplado, para o ciclo P θ teremos: $\frac{dF_I}{dX_I} = \frac{dP_I}{d\theta_I}$ e para o ciclo QV teremos: $\frac{dF_I}{dX_I} = \frac{dQ_I}{dV_I}$ para a barra I. Já as derivadas $\frac{dF_I}{dX_I} = \frac{dP_I}{dV_I}$ e $\frac{dF_I}{dX_I} = \frac{dQ_I}{d\theta_I}$, são consideradas zero devido aos fracos acoplamentos existentes entre P e V e entre Q e θ .

Então os três pontos que definem (esquerda inferior, superior e direita inferior) a função triangular de pertinência de ΔX_{fuz} são determinadas conforme mostrado a seguir:

$$LN: [-\infty, -\Delta X_{max}, -\Delta X_{max}/3]$$

$$MN: [-\Delta X_{max}, -\Delta X_{max}/2, 0]$$

$$SN: [-\Delta X_{max}/3, -\Delta X_{max}/6, 0]$$

$$ZR: [-\Delta X_{max}/12, 0, \Delta X_{max}/12]$$

$$SP: [0, \Delta X_{max}/6, \Delta X_{max}/3]$$

$$MP: [0, \Delta X_{max}/2, \Delta X_{max}]$$

$$LP: [\Delta X_{max}/3, \Delta X_{max}, +\infty]$$

O defuzzificador irá transformar o sinal de saída *fuzzy* ΔX_{fuz} no valor *crisp* ΔX para cada nó do sistema. Em [6] é dito que foi utilizado a estratégia de “defuzzificação” através do centroide de forma adaptada, porém não deixa claro qual adaptação foi realizada. Neste trabalho utilizou-se o centroide da área resultante como processo de “defuzzificação”. Sendo que centroide é um ponto que divide a área do sinal de saída do bloco de inferência em duas partes iguais.

Após a definição dos incrementos ΔX para as variáveis de estado em cada barra do

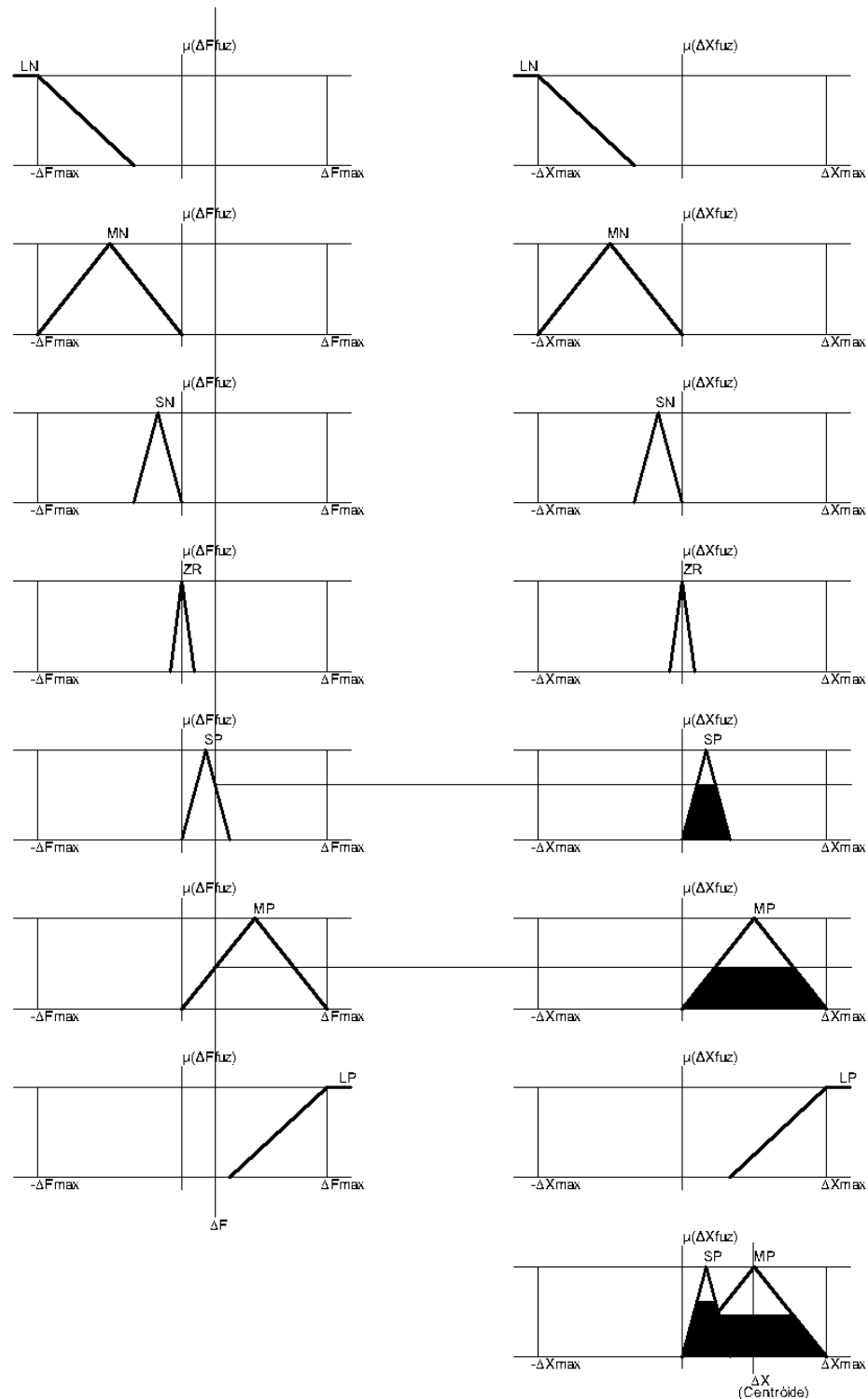
sistema, o vetor de estado é atualizado conforme:

$$X^{i+1} = X^i + \Delta X \quad (5.43)$$

Onde, X^{i+1} é o vetor de ângulo de fase ou de magnitude de tensão das barras da iteração em processamento e X^i é o mesmo vetor com os valores da iteração anterior. O sistema atingirá a convergência após sucessivas iterações se o maior elemento em ΔF for menor ou igual a 0.001 pu.

Na figura 5.6, podemos observar graficamente como o sistema de inferência *fuzzy* utiliza as funções de pertinência para determinar o valor de saída ΔX (que poderá ser o $\Delta\theta$ ou ΔV) para uma determinada entrada ΔF (ΔP ou ΔQ). Para a “defuzzificação” podemos observar que é calculado o centroide da área resultante.

Figura 5.6 – Representação da solução do sistema de inferência

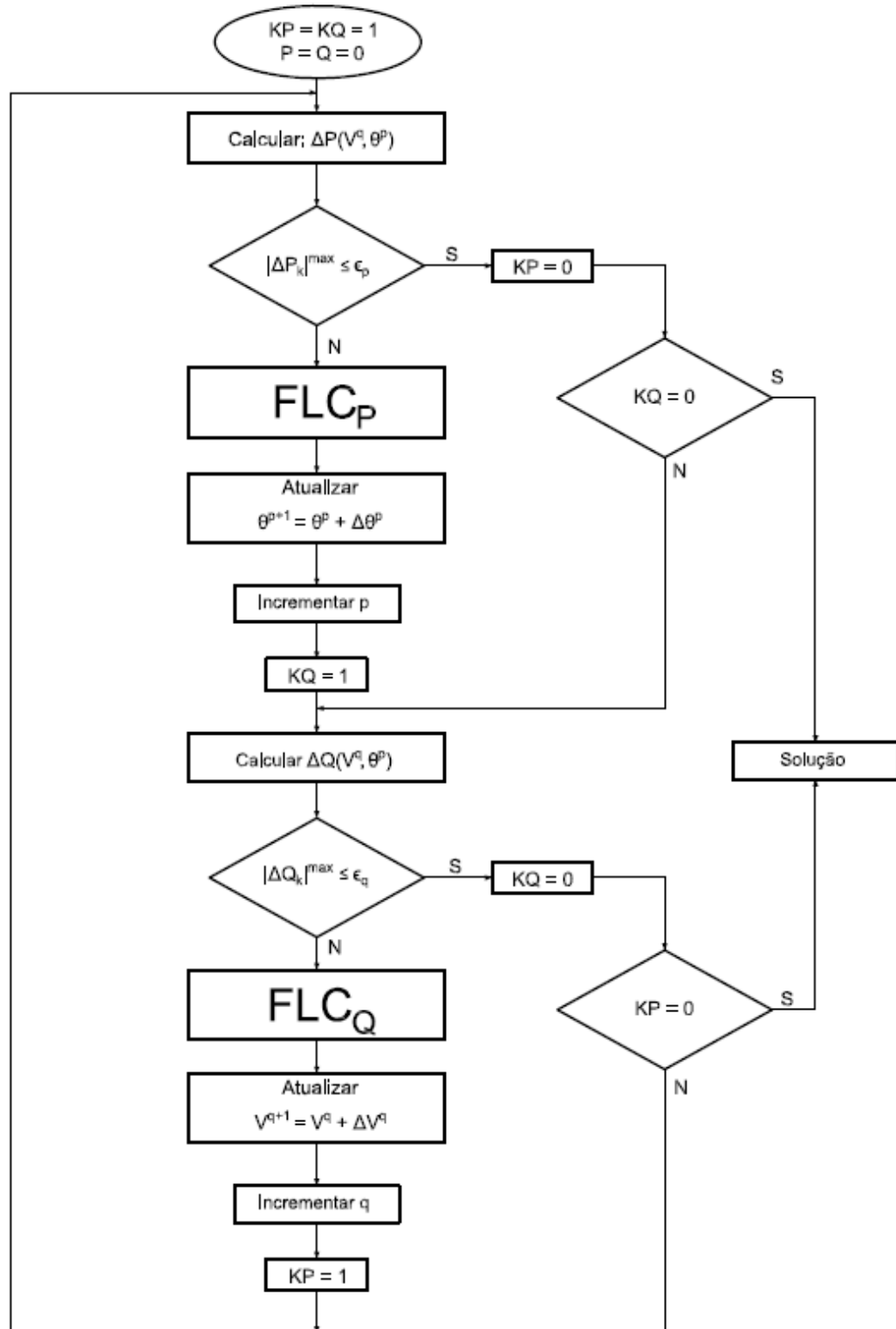


Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 5.7 é apresentado um fluxograma da metodologia com controlador *fuzzy* de forma mais detalhada do que apresentado anteriormente na Figura 5.3. O algoritmo em questão foi desenvolvido em ambiente Matlab®R2020 e utilizou-se *Fuzzy logic Toolbox* como auxílio

na montagem do sistema de inferência.

Figura 5.7 – Fluxograma da metodologia Newton-Raphson utilizando controlador *fuzzy*



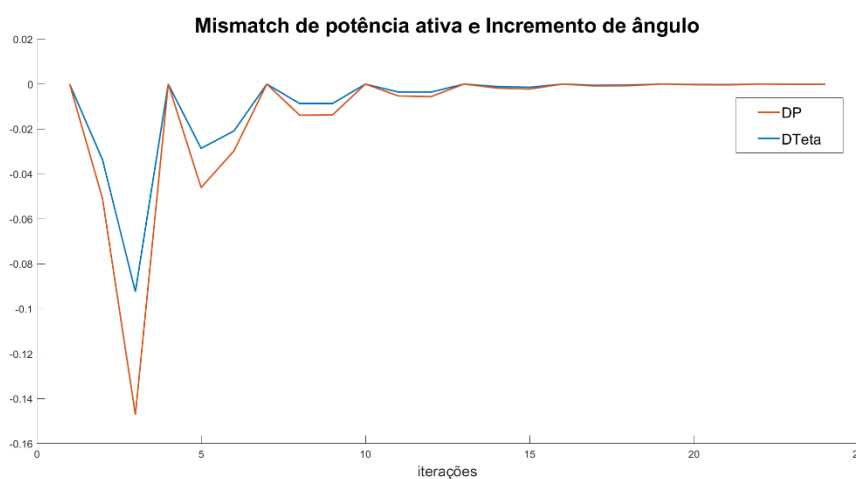
Fonte: Elaborado pelo autor

Nesta metodologia foram identificadas algumas questões básicas relacionadas com a tentativa de incluir de forma explícita as incertezas no problema de fluxo de carga. Esta metodologia mostrou-se adequada para implementação, porém insuficiente na intenção de obter na saída também resultados no domínio de conjuntos *fuzzy*. Especificamente, mostrou-se efetivo na substituição de parte do algoritmo do desacoplado tradicional por um sistema de inferência *fuzzy*.

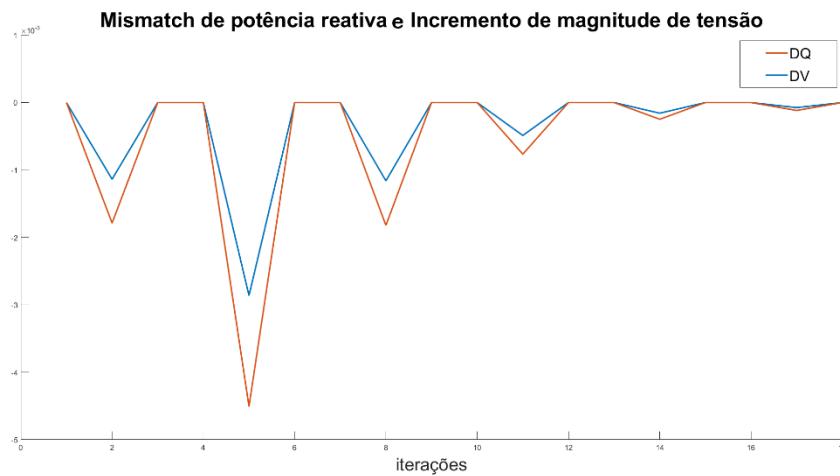
5.3.2 Exemplo Ilustrativo

Como sistema ilustrativo utilizaremos o mesmo sistema de 3 (três) barras apresentado na subseção 5.1.2. Na Figura 5.8 é possível observar a evolução ao longo das iterações dos incrementos de ângulos com saída do controlador *fuzzy* para os *mismatches* de potência ativa como entrada. Enquanto na Figura 5.9 podemos observar a mesma dinâmica para o *mismatch* de potência reativa. Onde o *mismatch* de potência reativa entra no controlador e tendo com saída os incrementos de magnitude de tensão de barra. É possível observar o processo de convergência do sistema.

Figura 5.8 – Mismatch de potência ativa e Incremento de ângulo



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.9 – Mismatch de potência reativa e Incremento de magnitude de tensão

Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 5.14 apresenta os resultados para o sistema de 3 (três) barras referido, para dados de barras, enquanto a Tabela 5.15 apresenta os fluxos de potência calculados para os ramos.

Os resultados se mostraram compatíveis com os encontrados na solução do seção 5.2.2, mostrando como o controlador pode efetivamente substituir parte do algoritmo do desacoplado rápido.

Tabela 5.14 – Resultados - Dados de barras

Barra	V_d [pu]	θ_d [°]	P_{inj}	Q_{inj}
1	1,000	0,000	20,22	-0,35
2	0,994	-4,377	-5,00	-1,99
3	0,980	-7,311	-14,99	-3,17

Tabela 5.15 – Resultados - Fluxo de potência nos ramos

Ramo	Potência Ativa		Potência Reativa		Perdas [MW]
	P_{km} [MW]	P_{mk} [MW]	Q_{km} [Mvar]	Q_{mk} [Mvar]	
1-2	7,60	-7,55	-0,88	-0,53	0,05
2-3	2,54	-2,53	-1,47	-2,30	0,01
1-3	12,62	-12,46	0,53	-0,88	0,16

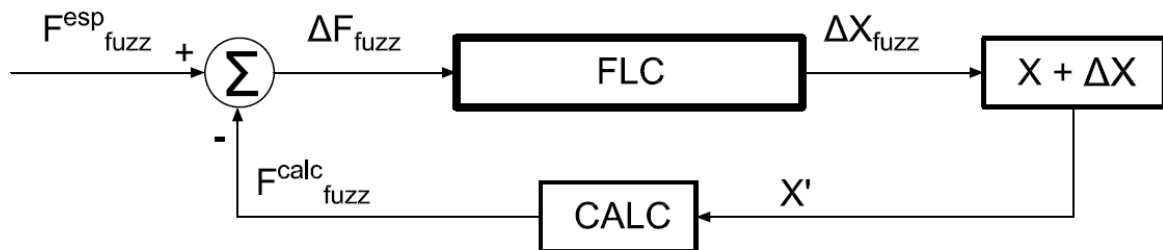
5.4 Metodologia Proposta (PFDFE)

Em [6] é apresentada uma metodologia de solução do fluxo de carga baseado no método desacoplado rápido. Nesse trabalho, a proposta principal apresentada é substituir o método de atualização dos vetores de estado θ e V . Para isso, invés de multiplicar-se pelo inverso da matriz B utiliza-se um sistema de inferência *fuzzy*, conforme foi apresentado no Capítulo 5, em que o sistema utilizado é nomeado como controlador *fuzzy*.

5.4.1 Formulação

Neste trabalho, realizou-se uma modificação significativa no método anteriormente apresentado em [6] para solução do fluxo de carga. Em [6], a entrada do controlador *fuzzy* corresponde à diferença entre a potência ativa ou reativa especificada para determinada barra e a potência ativa ou reativa calculada para a mesma barra. A esta diferença nomeou-se ΔP para potência ativa e ΔQ para potência reativa. Sendo que estes valores eram todos valores *crisp*. Diante disto, uma primeira modificação corresponde à natureza e modelagem dos dados de entrada no controlador, onde as potências de barra especificadas são distribuições de possibilidades triangulares. Consequentemente, os *mismatches* de potência ativa e reativa, ΔP e ΔQ respectivamente, são conjuntos *fuzzy* triangulares. Contudo, foi necessário modificar também o controlador para receber como entrada conjuntos *fuzzy* e, após o procedimento de inferência, entregar na saída a correção dos vetores de estado também representados como conjuntos *fuzzy* para cada barra, como podemos observar na Figura 5.10.

Figura 5.10 – Fluxograma da metodologia proposta



Fonte: Elaborado pelo autor

em que,

F_{fuzz}^{esp} = distribuições de possibilidades das injeções líquidas de potência ativa ou

reativa especificadas;

F_{fuzz}^{calc} = distribuições de possibilidades das injeções líquidas de potência ativa ou reativa calculadas;

ΔF_{fuzz} = distribuições de possibilidades dos *mismatches* de potência, i.e., a diferença entre as injeções de potência especificadas e as calculadas;

ΔX_{fuzz} = distribuições de possibilidades do incremento de ângulo de fase ou magnitude de tensão *fuzzy*;

X' = distribuições de possibilidades do ângulo de fase ou magnitude de tensão para a próxima iteração.

É importante ressaltar que no sistema desacoplado tradicional as variáveis de estados são inicializadas igualando os ângulos de fase das tensões a 0 (zero) e as magnitudes de tensão a 1 (um) p.u. Porém, neste trabalho propõe-se, com o intuito de termos variáveis de estado representadas por distribuições de possibilidades triangulares, que estas variáveis sejam inicializadas através das seguintes equações:

$$[\Delta\tilde{\theta}] = [B']^{-1}[\Delta\tilde{P}] \quad (5.44)$$

$$[\Delta\tilde{V}] = [B'']^{-1}[\Delta\tilde{Q}] \quad (5.45)$$

A Figura 5.11 mostra um esquema de um sistema de inferência Mamdani, SIF (Sistema de Inferência *Fuzzy*) de duas entradas com duas regras. Primeiro, o sistema de inferência difunde as duas entradas encontrando a interseção do valor de entrada *crisp* com a função de pertinência de entrada. Logo, utiliza o operador mínimo para calcular o *and fuzzy* combinando as duas entradas “fuzzificadas” para obter a força da regra. O sistema de inferência corta a função de associação de saída nessa força da regra. Finalmente, ele usa o operador máximo para calcular o *or fuzzy* para combinar as saídas das duas regras [25]. O controlador da seção 5.3 utiliza este modelo de sistema de inferência *fuzzy*.

Para calcular a saída deste SIF com base nas entradas, deve-se passar por seis etapas conforme descrito em [25]:

Passo 1: Determinar um conjunto de regras *fuzzy*;

Passo 2: Difundir as entradas usando as funções de associação de entrada;

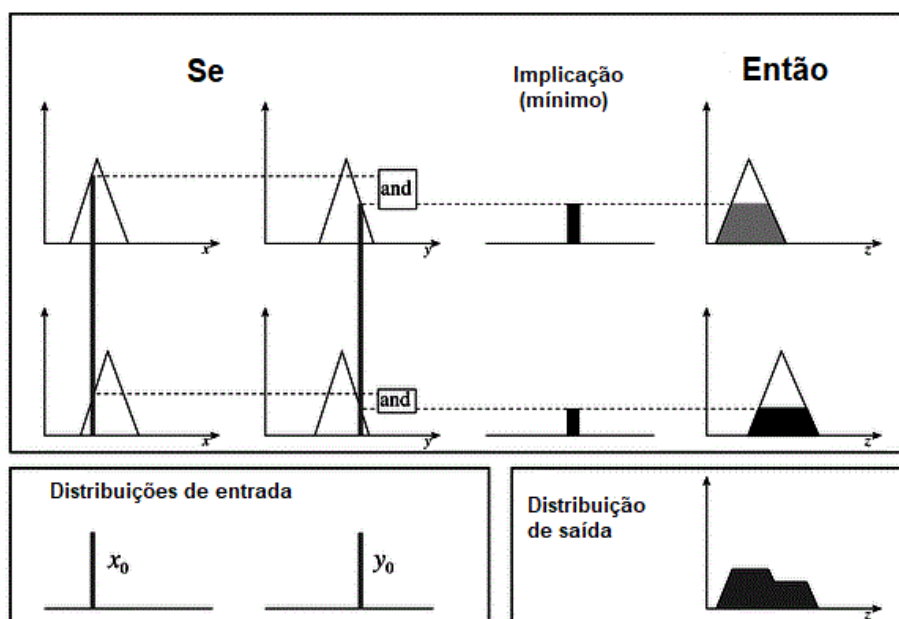
Passo 3: Combinar as entradas “fuzzificadas” de acordo com as regras *fuzzy* para estabelecer a força da regra;

Passo 4: Encontrar a consequência da regra combinando a força da regra e a função de associação de saída;

Passo 5: Combinar as consequências para obter uma distribuição de saída;

Passo 6: “Defuzzificação” da distribuição de saída (esta etapa é apenas se uma saída *crisp* (classe) for necessária).

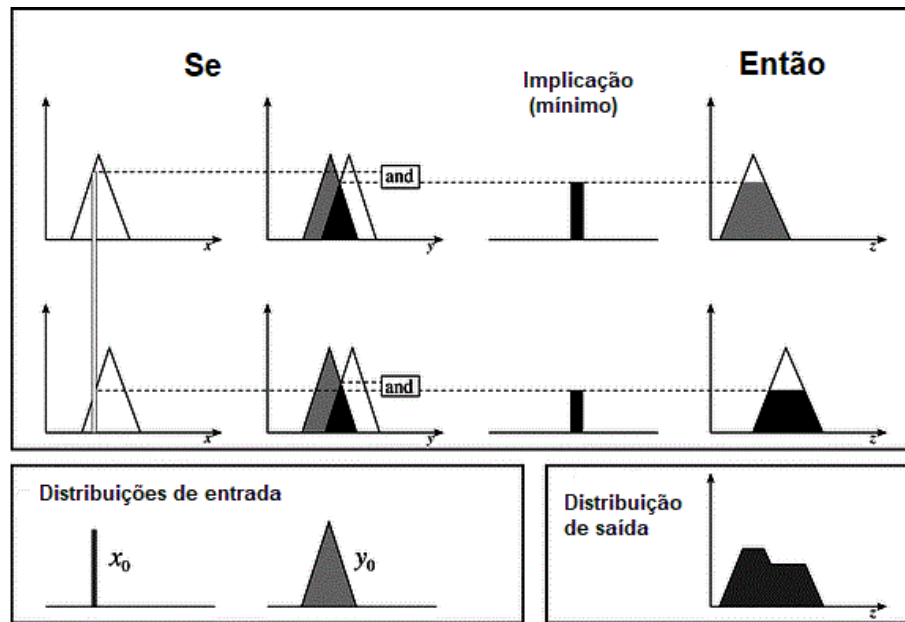
Figura 5.11 – Sistema de Inferência Mamdani de duas entradas, duas regras com entradas *crisp*



Fonte: [25]

Porém para lidar com as incertezas nas variáveis de entrada do problema de fluxo de carga é necessário modificar o SIF mostrado anteriormente. A Figura 5.12 mostra uma modificação do Mamdani SIF onde a entrada y_0 é *fuzzy*, não mais *crisp* como considerado no sistema de inferência anterior. A função *fuzzy* de entrada é combinada com a função de pertinência de entrada de regra usando o *and fuzzy* conforme sugerido em [25].

Figura 5.12 – Sistema de Inferência Mamdani de duas entradas, duas regras com entradas *fuzzy*



Fonte: [25]

Como a distribuição de saída do controlador pode ter formatos variados, e neste trabalho as distribuições que representam as injeções de potências *fuzzy* na barra são funções de pertinência triangulares, verificou-se a dificuldade na atualização do vetor de estados na forma $X + \Delta X$ como apresentado no bloco da Figura 5.10, já que a soma de dois números *fuzzy* com formatos diferentes necessariamente não gerariam conjuntos *fuzzy* no formato triangular. Para lidar com esse problema, neste trabalho, optou-se por utilizar o MOM (Médio dos Máximos), LOM (Maior dos Máximos) e SOM (Menor dos Máximos) do ΔX , conforme Figura 5.13, para serem somados ao X da iteração anterior, na atualização do vetor de estados. Logo, para uma distribuição triangular dada por $\mu_X(x) = \mu_X(x; a, b, c)$, estipula-se que a distribuição da soma $X + \Delta X$, seria dada por:

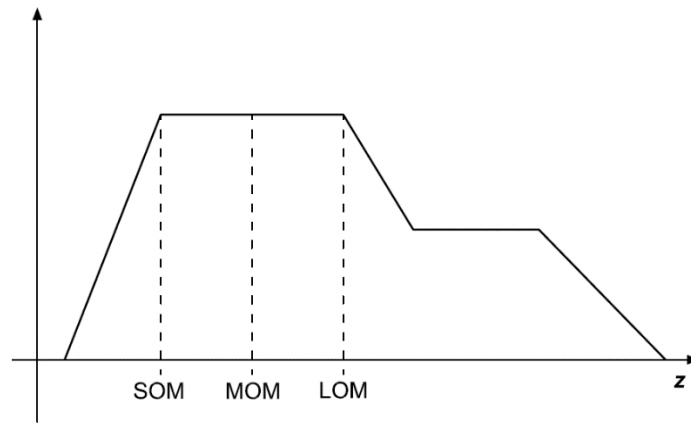
$$\mu(X + \Delta X) = \mu(x; a + SOM, b + MOM, c + LOM) \quad (5.46)$$

O resultado de (5.46) é o vetor de estado para a nova iteração que será utilizado para recalculer as potências líquidas calculadas e consequentemente subtraídas das potências líquidas especificadas encontrando, assim, as novas entradas do controlador ΔX , conforme Figura 5.10.

Como critério de parada, ou critério de convergência, utiliza-se a diferença entre o valor central da distribuição de possibilidades $\Delta \tilde{F}$ ($\Delta \tilde{P}$ ou $\Delta \tilde{Q}$) da atual iteração com a iteração anterior. Essa diferença é calculada para todas as barras do sistema. Quando o maior valor dentro

desse vetor de diferenças for menor ou igual que a tolerância pré-especificada (neste trabalho, foi fixada em 10^{-4}) considera-se que o algoritmo convergiu.

Figura 5.13 – SOM, MOM e LOM de uma distribuição *fuzzy*



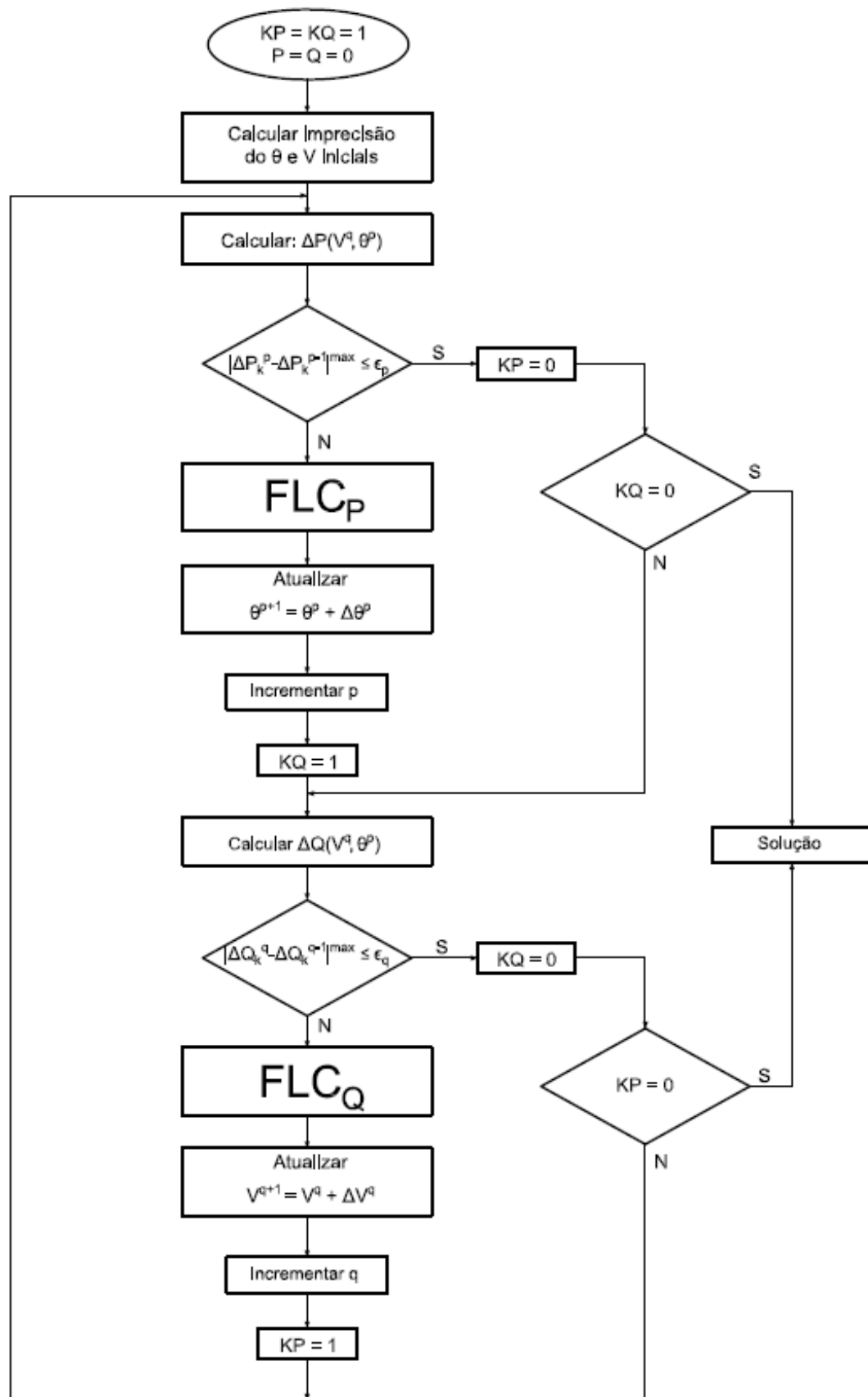
Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 5.14 apresenta-se o fluxograma do algoritmo da metodologia proposta neste trabalho. O algoritmo foi implementado em Python 3.7.7 utilizando-se da biblioteca *Scikit-fuzzy* 0.2.

Esta metodologia modifica a apresentado na seção 5.3 de forma a utilizar o sistema de inferência com entrada *fuzzy*. Isto permite estabelecer potências especificadas por barra do sistema como uma distribuição de possibilidade *fuzzy*. Se considerarmos que os valores centrais das distribuições triangulares dos vetores de estado resultantes deveriam se aproximar dos valores encontrados na solução tradicional do método desacoplado, chegamos à conclusão de que quanto maior a relação X/R da rede melhor será a aproximação das soluções obtidas.

Os testes realizados mostraram melhor performance para redes que apresentam uma relação $X/R > 20$. Esse tipo de relações X/R são típicas de redes de extra alta tensão.

Figura 5.14 – Fluxograma do algoritmo da metodologia proposta

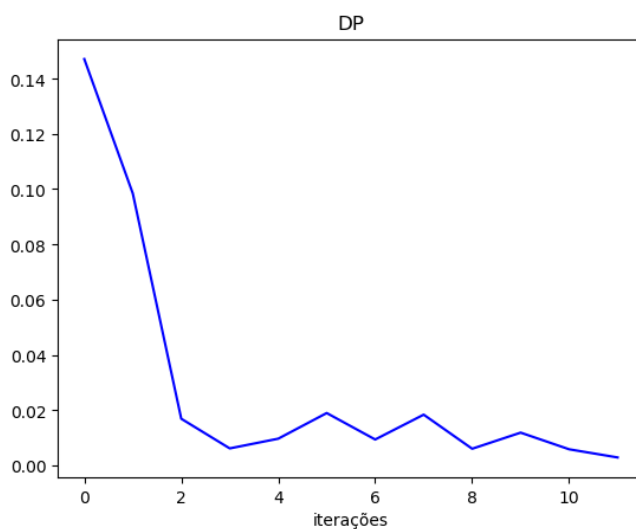


5.4.2 Exemplo Ilustrativo

Como sistema ilustrativo utilizaremos o mesmo sistema de 3 (três) barras apresentado na subseção 5.1.2 .

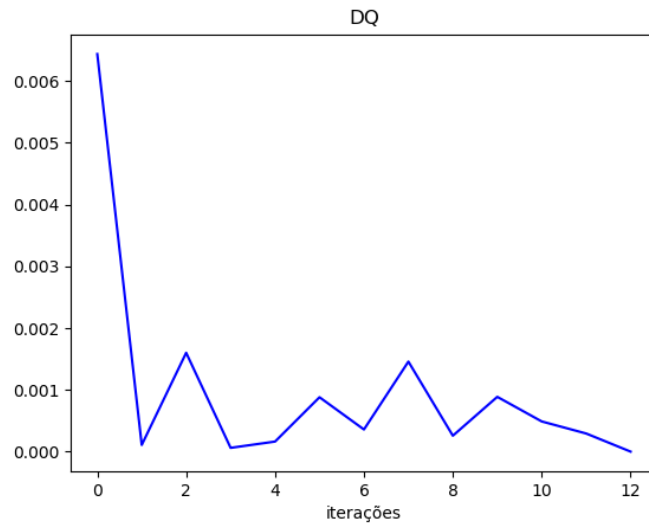
A inicialização do sistema é realizada com a definição das magnitudes de tensão e ângulos de fase conforme as equações (5.44) e (5.45), respectivamente. Ao longo das iterações é calculado o *mismatch* de potência por barra que será a entrada do controlador *fuzzy*. Nas figuras baixo é possível observar a evolução dos *mismatches* ao longo das iterações para a barra de maior *mismatch*.

Figura 5.15 – Evolução do *mismatch* de potência ativa ao longo das iterações



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.16 – Evolução do *mismatch* de potência reativa ao longo das iterações



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 5.16 – Resultados para as tensões nodais

Barra	Magnitude[p.u.]			Ângulos [°]		
	a	b	c	a	b	c
2	0,99002	0,9909	0,9919	-8,19	-4,54	-0,88
3	0,98000	0,9800	0,9800	-9,05	-7,50	-5,95

Da Tabela 5.18, pode-se observar que a imprecisão resultante da magnitude de tensão é bem reduzida e em contrapartida os ângulos de fase resultantes apresentam imprecisão muito grande.

As possibilidades de valores para os fluxos de potência nos ramos são apresentadas na Tabela 5.17.

Tabela 5.17 – Fluxos de potências ativas e reativas nos ramos

Ramo	Potência Ativa [MW]			Potência Reativa [Mvar]			Perdas [MW]		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
1-2	7,820	7,883	7,946	-0,575	-0,573	-0,570	0,0613	0,0623	0,0633
2-3	2,503	2,547	2,591	-1,613	-1,610	-1,608	0,0130	0,0135	0,0139
1-3	12,926	12,952	12,979	0,543	0,544	0,544	0,1695	0,1701	0,1708

Pode-se observar que, a imprecisão resultante de fluxo de potência foi bem menor que

no apresentado no método PFNRF (Seção 5.2).

5.5 Comparação das Metodologias

Nas seções anteriores foram apresentadas 4 (quatro) metodologias que utilizam lógica *fuzzy* no problema fluxo de carga. Todas elas foram implementadas computacionalmente e testadas usando um sistema exemplo de 3 (três) barras.

A Tabela 5.18 retoma de forma resumida as siglas que serão utilizadas na comparação dos resultados de forma a facilitar a referência a cada metodologia, sendo que a coluna “Seção” lista em que parte do texto foi descrito a metodologia referenciada.

Tabela 5.18 – Siglas das Metodologias

Metodologia	Seção	Sigla
Newton-Raphson	3.1	PFNR
Versão Desacoplada	3.2	PFD
Linearizado	3.3	PFL
Linearizado <i>fuzzy</i>	5.1	PFLF
Newton-Raphson <i>fuzzy</i>	5.2	PFNRF
Desacoplado com controlador <i>fuzzy</i> e entrada <i>crisp</i>	5.3	PFDFC
Desacoplado com controlador <i>fuzzy</i> e entrada <i>fuzzy</i> (Metodologia proposta)	5.4	PFDFF

Inicialmente se utilizou um sistema de inferência *fuzzy*, também chamado de controlador *fuzzy* no auxílio na solução do desacoplado rápido com entradas *crisp* e comparou-se o resultado com a versão do Newton Raphson desacoplada convencional. Conforme é possível observar na Tabela 5.19, não houve diferença no resultado no cálculo das variáveis de estado, consequentemente os fluxos de potência nos ramos apresentados na Tabela 5.20 também apresentaram resultados quase idênticos, mostrando a efetividade do uso do controlador *fuzzy* apresentado na seção 5.3 como parte da solução do método desacoplado. O fluxo de potência no ramo entre as barras 1 e 3 apresentou uma diferença de 0,08% entre os métodos devido arredondamento numérico, o mesmo ocorreu com o ramo 2-3.

Tabela 5.19 – Módulos e ângulos de fase das tensões nodais

Barra	Magnitude [p.u.]			Ângulos [°]		
	PFD	PFDFC	%	PFD	PFDFC	%
2	0,994	0,994	0,00	-4,377	-4,377	0,00
3	0,980	0,980	0,00	-7,311	-7,311	0,00

Tabela 5.20 – Fluxos de potência nos ramos

Ramo	Potência Ativa [MW]			Potência Reativa [Mvar]		
	PFD	PFDFC	%	PFD	PFDFC	%
1-2	7,603	7,600	0,04	-0,877	-0,880	0,30
2-3	2,545	2,540	0,20	-1,467	-1,470	0,18
1-3	12,630	12,620	0,08	0,534	0,530	0,82

A seguir, realizou-se uma comparação dos resultados das três metodologias que utilizam a injeção de potência por barra como números *fuzzy*.

Para facilitar a interpretação dos resultados obtidos, apresentou-se os valores das extremidades da função de pertinência triangular (a e c) e o valor central (b). Sendo que para avaliar a incerteza em cada distribuição de possibilidade foi utilizado a métrica do desvio padrão (STD) da função triangular usando a toolbox *statistics* do Matlab®.

Ressaltando que para o fluxo linearizado (PFLF) serão apresentados somente os ângulos de tensão de barra e os fluxos de potência ativa nos ramos.

Tabela 5.21 – Ângulos de fase das tensões

Barra	Ângulos [°]											
	PFLF				PFNRF				PFDFF			
	a	b	c	STD	a	b	c	STD	a	b	c	STD
2	-4,00	-4,30	-4,60	0,123	-4,69	-4,38	-4,06	0,129	-8,19	-4,54	-0,88	1,492
3	-6,66	-7,16	-7,67	0,205	-7,84	-7,31	-6,78	0,215	-9,05	-7,5	-5,95	0,633

Tabela 5.22 – Magnitude de tensão na barra 2

Barra	Magnitude de Tensão [p.u.]											
	PFLF				PFNRF				PFDFF			
	a	b	c	STD	a	b	c	STD	a	b	c	STD
2	-	-	-	-	0,9925	0,9940	0,9956	0,0006	0,9925	0,9909	0,9919	0,0004

Tabela 5.23 – Fluxos de potência nos ramos – Potência ativa

Ramo	Fluxo de Potência ativa [MW]											
	PFLF				PFNRF				PFDFF			
	a	b	c	STD	a	b	C	STD	a	b	c	STD
1-2	6,98	7,50	8,03	0,214	7,06	7,60	8,15	0,222	7,82	7,88	7,95	0,026
2-3	2,32	2,50	2,68	0,073	1,82	2,55	3,27	0,295	2,50	2,55	2,59	0,018
1-3	11,63	12,50	13,38	0,357	11,73	12,63	13,53	0,367	12,93	12,95	12,98	0,011

Tabela 5.24 – Fluxo de potência nos ramos – Potência reativa

Ramo	Fluxo de Potência Reativa [Mvar]											
	PFLF				PFNRF				PFDFF			
	a	b	c	STD	a	b	c	STD	a	b	c	STD
1-2	-	-	-	-	-1,05	-0,88	-0,71	0,069	-0,575	-0,573	-0,570	0,0010
2-3	-	-	-	-	-1,57	-1,47	-1,36	0,043	-1,613	-1,610	-1,608	0,0010
1-3	-	-	-	-	0,51	0,53	0,56	0,010	0,543	0,544	0,544	0,0002

Dos resultados mostrados nas tabelas anteriores, é possível observar como os valores centrais das distribuições de possibilidades dos resultados são bem semelhantes entre as metodologias. Porém, a faixa de valores possíveis para cada variável, que corresponde à base destas distribuições triangulares, diferem de uma metodologia para outra. Sendo que as menores imprecisões para os fluxos de potência nos ramos são apresentadas pela metodologia proposta neste trabalho (PFDFF), em contrapartida esta metodologia apresenta a maior imprecisão nos ângulos de tensão (para os ângulos de fase das barras 2 e 3, respectivamente).

Tabela 5.25 – Perdas de potência ativa nos ramos

Ramo	Perdas de potência ativa [MW]											
	PFNRF				PFNRF com Matriz S				PFDFF			
	a	b	c	STD	a	b	c	STD	a	b	c	STD
1-2	0,050	0,058	0,066	0,0034	0,050	0,058	0,066	0,0033	0,061	0,062	0,063	0,0004
2-3	0,006	0,014	0,021	0,0031	0,010	0,014	0,017	0,0015	0,013	0,014	0,014	0,0002
1-3	0,139	0,162	0,185	0,0093	0,139	0,162	0,185	0,0093	0,170	0,170	0,171	0,0003

Com relação às perdas nos ramos, a metodologia PFLF desconsiderou as perdas, logo realizou-se a comparação entre PFNRF e PFDFF (ver Tabela 5.25), ressaltando que neste trabalho houve uma proposta de alteração no cálculo de perdas para metodologia PFNRF apresentada em [4].

O impacto dessa alteração no método de cálculo é sentido com maior intensidade nos ramos com menor fluxo de potência ou fluxo invertido. A metodologia apresentada em [4], utilizando a matriz sensibilidade S , mostrou-se de maior complexidade, mas com resultados de menores imprecisões. Sendo que a imprecisão das perdas calculadas pela metodologia proposta (PFDF) mostrou-se bem menor do que os outros métodos analisados.

Capítulo 6

Testes e análise de resultados

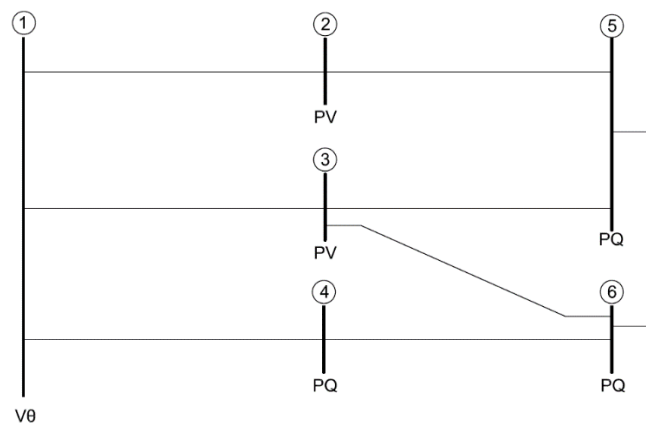
Com intuito de observar o comportamento das metodologias apresentadas para solução do problema do fluxo de carga apresenta-se a seguir resultados para dois sistemas teste encontrados na literatura técnica: o sistema de 6 barras utilizado em [6] e o sistema IEEE 14 barras. Sendo que, a imprecisão utilizada nos dados de potência de entrada para os sistemas a seguir foi de 5% para cima e para baixo, para o sistema de 6 barras e 7% do valor nominal para o de 14 barras.

6.1 Sistema 6 (seis) Barras

6.1.1 Dados do sistema

A topologia para o sistema de 6 barras é mostrada na Figura 6.1. Observe que cada uma das barras foi tipificada como V θ , PV e PQ. Os dados das funções de possibilidades triangulares para as potências especificadas nas barras são apresentados na Tabela 6.1.

Figura 6.1 – Topologia Sistema 6 barras



Fonte: Elaborado pelo autor

Os dados de resistência, reatância, capacitância shunt e tap dos transformadores (caso existam) são apresentados na Tabela 6.2.

Tabela 6.1 – Dados de potência de barra do sistema 6 barras

Barra	P _{geração} (MW)			Q _{geração} (Mvar)			P _{carga} (MW)			Q _{carga} (Mvar)		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
1	332,5	350,0	367,5	106,9	112,5	118,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	237,5	250,0	262,5	35,6	37,5	39,4	47,5	50,0	52,5	35,6	37,5	39,4
3	237,5	250,0	262,5	35,6	37,5	39,4	95,0	100,0	105,0	71,3	75,0	78,8
4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	190,0	200,0	210,0	142,5	150,0	157,5
5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	190,0	200,0	210,0	142,5	150,0	157,5
6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	285,0	300,0	315,0	213,8	225,0	236,3

Tabela 6.2 – Dados dos ramos do sistema 6 barras

Ramo	R[p.u.]	X[p.u.]	b ^{sh} [p.u.]	Tap[p.u.]
1-2	0,0011	0,20	0,08	1,00
1-3	0,0011	0,20	0,08	1,00
1-4	0,0011	0,20	0,08	1,00
2-5	0,0011	0,20	0,08	1,00
3-5	0,0011	0,20	0,08	1,00
3-6	0,0011	0,20	0,08	1,00
4-6	0,0011	0,20	0,08	1,00
5-6	0,0011	0,20	0,08	1,00

6.1.2 Resultados

O sistema de 6 barras é simulado computacionalmente usando as metodologias analisadas para a solução do problema de fluxo de potência incluindo as incertezas das variáveis de entrada. Os principais resultados são mostrados a seguir.

Primeiramente, resultados do problema de fluxo de carga usando a versão desacoplada do Newton-Raphson (PFD) e da versão desacoplada com controlador *fuzzy* (PFD_{FC}) são obtidos. Na Tabela 6.3 são apresentadas as magnitudes e ângulos de fase das tensões nodais bem como os erros obtidos nos resultados duas metodologias. De forma similar, os fluxos de potência ativa e reativa nos ramos são apresentados na Tabela 6.4.

Tabela 6.3 – Tensões nas barras (magnitude e ângulo)

Barra	Magnitude [p.u.]			Ângulos [°]		
	PFD	PFDFC	%	PFD	PFDFC	%
2	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	1,00	1,00	0,00	-0,13	-0,13	0,00
4	0,99	0,99	0,00	-0,27	-0,27	0,00
5	0,99	0,99	0,00	-0,22	-0,22	0,00
6	0,99	0,99	0,00	-0,31	-0,31	0,00

Tabela 6.4 – Fluxos de potência nos ramos

Ramo	Potência Ativa [MW]			Potência Reativa [Mvar]		
	PFD	PFDFC	%	PFD	PFDFC	%
1-2	-1,40	-1,41	0,71	0,04	0,04	0,00
1-3	110,23	110,22	0,01	-5,98	-5,98	0,00
1-4	241,43	241,42	0,00	155,36	155,35	0,01
2-5	198,60	198,59	0,01	101,41	101,40	0,01
3-5	87,20	87,20	0,00	107,23	107,22	0,01
3-6	173,02	173,02	0,00	164,95	164,94	0,01
4-6	41,34	41,33	0,02	3,79	3,79	0,00
5-6	85,72	85,72	0,00	57,42	57,41	0,02

Pode-se concluir com base nos resultados mostrados anteriormente que ambas as metodologias obtêm os mesmos resultados. Isso era esperado pela observação que a correção das variáveis de estado do fluxo de carga em cada iteração era diretamente análoga aos *mismatches* de potência em cada nó da rede. Além disso, no PFDFC é feita uma inferência baseada em regras para a atualização de valores *crisp* de variáveis evitando operações aritméticas *fuzzy* implicando assim em não sobreposição de incertezas ao longo das iterações. Logo, espera-se uma convergência similar ao método tradicional.

De forma similar, as metodologias para o fluxo de carga linearizado *fuzzy* (PFLF), fluxo de carga de Newton-Raphson *fuzzy* (PFNRF) e a metodologia proposta (PFDFC) são implementadas para obter solução ao sistema de 6 barras.

As tabelas Tabela 6.5 e Tabela 6.6. apresentam os valores das tensões (ângulos e magnitudes, respectivamente) para as barras do sistema. As tabelas Tabela 6.7 e Tabela 6.8, apresentam os fluxos de potência ativa e reativa respectivamente para os ramos presentes no sistema. Finalmente na Tabela 6.9 são apresentadas as perdas de potência ativa nos ramos do sistema.

Pode-se notar que, para todos os resultados obtidos, é calculado o desvio padrão (*standard deviation* - STD) associado à distribuição de possibilidade *fuzzy* obtida.

Tabela 6.5 – Ângulos das tensões nas barras

Barra	Ângulos [°]											
	PFLF				PFNRF				PFDFF			
	a	b	c	STD	a	b	c	STD	a	b	c	STD
2	-0,01	-0,01	0,00	0,001	-0,03	0,00	0,04	0,014	-0,04	0,00	0,03	0,014
3	-0,12	-0,13	-0,13	0,001	-0,17	-0,13	-0,09	0,017	-0,17	-0,13	-0,10	0,014
4	-0,26	-0,28	-0,29	0,005	-0,30	-0,27	-0,24	0,013	-0,31	-0,28	-0,25	0,013
5	-0,22	-0,23	-0,24	0,004	-0,27	-0,22	-0,17	0,019	-0,28	-0,24	-0,20	0,016
6	-0,31	-0,33	-0,34	0,005	-0,36	-0,32	-0,27	0,020	-0,37	-0,33	-0,30	0,015

Tabela 6.6 – Magnitude das tensões nodais

Barra	Magnitude de Tensão [p.u.]											
	PFLF				PFNRF				PFDFF			
	a	b	c	STD	a	b	c	STD	a	b	c	STD
4	-	-	-	-	0,9960	0,9970	0,9970	0,0002	0,9967	0,9969	0,9971	0,0001
5	-	-	-	-	0,9980	0,9980	0,9980	0,0000	0,9968	0,9969	0,9970	0,0000
6	-	-	-	-	0,9960	0,9970	0,9970	0,0002	0,9962	0,9964	0,9966	0,0001

Tabela 6.7 – Fluxos de potência nos ramos – Potência ativa

Ramo	Fluxo de Potência ativa [MW]											
	PFLF				PFNRF				PFDFF			
	a	b	c	STD	a	b	c	STD	a	b	c	STD
1-2	3,71	5,43	6,00	0,49	-32,33	-1,40	29,53	12,63	-29,05	0,84	30,72	12,20
1-3	108,00	112,00	114,00	1,25	74,47	110,23	145,99	14,60	86,90	117,37	147,84	12,44
1-4	231,00	242,57	252,29	4,35	212,46	241,43	270,390	11,82	219,94	247,11	274,27	11,09
2-5	186,00	195,43	203,71	3,62	126,21	198,60	270,99	29,55	140,23	204,78	269,34	26,35
3-5	84,00	88,86	93,43	1,93	9,98	87,20	164,42	31,52	23,46	88,61	153,76	26,60
3-6	164,00	173,14	180,57	3,39	94,47	173,02	251,57	32,07	112,81	175,23	237,65	25,48
4-6	41,00	42,29	42,57	0,34	-30,37	41,34	113,05	29,28	-14,05	45,05	104,14	24,13
5-6	80,00	84,29	87,14	1,47	1,47	85,72	169,97	34,39	19,75	86,39	153,03	27,21

Tabela 6.8 – Fluxos de potência nos ramos – Potência reativa

Ramo	Fluxo de Potência Reativa [Mvar]											
	PFLF				PFNRF				PFDFE			
	a	b	c	STD	a	b	c	STD	a	b	c	STD
1-2	-	-	-	-	-1,66	0,04	1,74	0,69	-0,05	-0,04	-0,04	0,001
1-3	-	-	-	-	-7,87	-5,98	-4,09	0,77	-0,55	-0,55	-0,55	0,000
1-4	-	-	-	-	142,08	155,36	168,63	5,42	154,30	154,38	154,46	0,032
2-5	-	-	-	-	89,85	101,41	112,96	4,72	154,37	154,42	154,48	0,022
3-5	-	-	-	-	95,25	107,23	119,20	4,89	154,67	154,72	154,78	0,022
3-6	-	-	-	-	148,68	164,95	181,22	6,64	179,46	179,54	179,62	0,034
4-6	-	-	-	-	-24,02	3,79	31,60	11,35	24,56	24,72	24,89	0,066
5-6	-	-	-	-	32,91	57,42	81,92	10,00	24,42	24,55	24,69	0,055

Tabela 6.9 – Perdas de potência ativa nos ramos

Ramo	Perdas de potência ativa [MW]											
	PFNRF				PFNRF com Matriz S				PFDFE			
	a	b	c	STD	a	b	c	STD	a	b	c	STD
1-2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00000
1-3	0,005	0,013	0,022	0,004	0,005	0,013	0,022	0,004	0,0015	0,0015	0,0015	0,00000
1-4	0,072	0,091	0,110	0,008	0,076	0,091	0,105	0,006	0,0093	0,0093	0,0094	0,00001
2-5	0,022	0,055	0,087	0,013	0,045	0,055	0,065	0,004	0,0072	0,0072	0,0073	0,00001
3-5	0,005	0,021	0,037	0,006	0,018	0,021	0,024	0,001	0,0035	0,0035	0,0035	0,00001
3-6	0,030	0,063	0,096	0,013	0,057	0,063	0,069	0,002	0,0069	0,0069	0,0070	0,00001
4-6	-0,005	0,002	0,009	0,003	0,000	0,002	0,004	0,001	0,0003	0,0003	0,0003	0,00000
5-6	-0,006	0,012	0,030	0,007	0,009	0,012	0,015	0,001	0,0009	0,0009	0,0009	0,00001

Dos resultados obtidos, pode-se concluir que para o sistema 6 barras tanto os ângulos de fase quanto as magnitudes de tensão nas barras se comportam de forma muito semelhante nas metodologias comparadas, sendo que os ângulos apresentaram menor desvio padrão para o método linearizado (PFLF). Porém, o método proposto (PFDFE) apresentou valores semelhantes ao PFNRF.

Ao observarmos a Tabela 6.7, concluímos que a não-linearidade dos métodos PFNRF e PFDFE influencia no aumento da imprecisão das distribuições de possibilidades resultantes. Como esperado, o PFLF apresenta valores de desvio padrão reduzidos se comparados com os outros dois mencionados. O método proposto (PFDFE), apesar de apresentar desvio padrão um pouco menor que o PFNRF, exibe valores da mesma ordem, logo pode-se considerar que os resultados foram semelhantes.

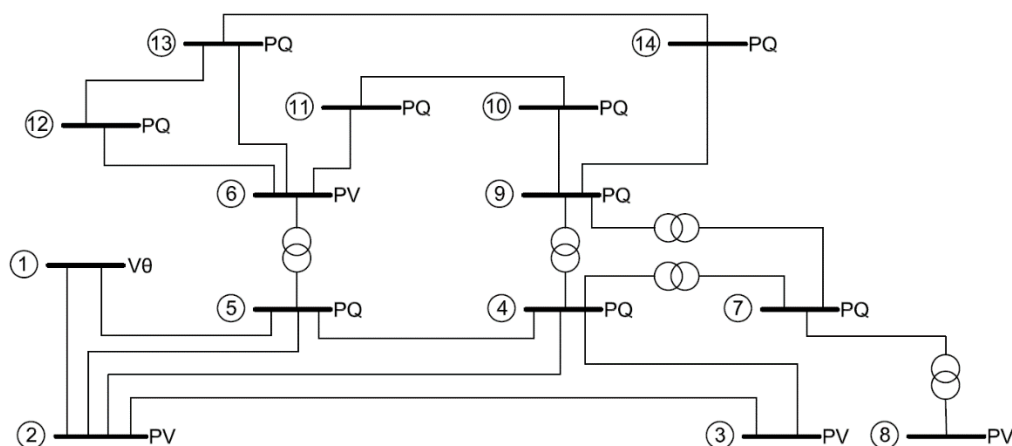
As maiores discrepâncias entre os métodos proposto (PFDFF) e o PFNRF foi no resultado do fluxo de potência reativo. Os valores centrais apresentaram considerável diferença, e o nível de incerteza medido pelo desvio padrão foi bem reduzido no método proposto. O mesmo pode ser observado na Tabela 6.9 referente as perdas.

6.2 Sistema 14 (catorze) Barras

6.2.1 Dados do sistema

Na Figura 6.2 é apresentada a topologia do sistema de IEEE 14 barras. Nesta figura mostra-se o tipo de cada tipo de barra como sendo V θ , PQ e PV. Para as barras PV, os valores das magnitudes das tensões são fixadas conforme Tabela 6.10.

Figura 6.2 – Topologia do sistema de 14 barras



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 6.10 – Magnitudes de tensão nas barras tipo PV

Barra	Tipo	V (p.u.)
2	PV	1,045
3	PV	1,010
6	PV	1,070
8	PV	1,090

Os dados das potências especificadas como distribuições de possibilidades do tipo triangular, em cada barra, são apresentados na Tabela 6.11. Adicionalmente, os dados relacionados com as especificações técnicas dos ramos são mostrados na Tabela 6.12.

Tabela 6.11 – Dados de potência de barra do sistema 14 barras

Barra	P _{geração} (MW)			Q _{geração} (Mvar)			P _{carga} (MW)			Q _{carga} (Mvar)		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
1	37,20	40,00	42,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	20,18	21,70	23,22	11,81	12,70	13,59
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	87,61	94,20	100,79	17,67	19,00	20,33
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	44,45	47,80	51,15	-3,63	-3,90	-4,17
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,07	7,60	8,13	1,49	1,60	1,71
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,42	11,20	11,98	6,98	7,50	8,03
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	27,44	29,50	31,57	15,44	16,60	17,76
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,37	9,00	9,63	5,39	5,80	6,21
11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,26	3,50	3,75	1,67	1,80	1,93
12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,67	6,10	6,53	1,49	1,60	1,71
13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	12,56	13,50	14,45	5,39	5,80	6,21
14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	13,86	14,90	15,94	4,65	5,00	5,35

Tabela 6.12 – Dados dos ramos do sistema 14 barras

Ramo	R[p.u.]	X[p.u.]	b ^{sh} [p.u.]	Tap[p.u.]
1-2	0,00	0,059	0,053	1,000
1-5	0,00	0,223	0,049	1,000
2-3	0,00	0,198	0,044	1,000
2-4	0,00	0,176	0,037	1,000
2-5	0,00	0,174	0,034	1,000
3-4	0,00	0,171	0,035	1,000
4-5	0,00	0,042	0,013	1,000
4-7	0,00	0,209	0,000	0,978
4-9	0,00	0,556	0,000	0,969
5-6	0,00	0,252	0,000	0,932
6-11	0,00	0,199	0,000	1,000
6-12	0,00	0,256	0,000	1,000
6-13	0,00	0,130	0,000	1,000
7-8	0,00	0,176	0,000	1,000
7-9	0,00	0,110	0,000	1,000
9-10	0,00	0,085	0,000	1,000
9-14	0,00	0,270	0,000	1,000
10-11	0,00	0,192	0,000	1,000
12-13	0,00	0,200	0,000	1,000
13-14	0,00	0,348	0,000	1,000

As metodologias revisadas neste trabalho foram simuladas no sistema teste para avaliar a sua aplicabilidade e performance na obtenção de resultados ao problema de fluxo de carga quando consideradas incertezas modeladas de forma possibilista na rede.

6.2.2 Resultados

As primeiras simulações para este sistema foram realizadas considerando a versão desacoplada do método de Newton-Raphson tradicional (PFD) bem como a versão desacoplada (PFDFC) usando o sistema de inferência *fuzzy* através do controlador que utiliza valores *crisp*. A magnitudes e ângulos de fase obtidos para cada metodologia são apresentados na Tabela 6.13.

Tabela 6.13 – Magnitudes e ângulos de fase das tensões nodais

Barra	Magnitude [p.u.]			Ângulos [°]		
	PFD	PFDFC	%	PFD	PFDFC	%
2	1,045	1,045	0,00	-5,53	-5,30	4,25
3	1,010	1,010	0,00	-12,83	-12,42	3,21
4	1,055	1,057	0,17	-10,40	-9,86	5,16
5	1,061	1,063	0,14	-8,96	-8,48	5,26
6	1,070	1,070	0,00	-14,68	-13,60	7,36
7	1,057	1,059	0,14	-13,62	-12,67	7,00
8	1,090	1,090	0,00	-13,62	-12,58	7,68
9	1,052	1,053	0,10	-15,29	-14,23	6,95
10	1,050	1,052	0,15	-15,57	-14,44	7,23
11	1,058	1,059	0,09	-15,30	-14,14	7,57
12	1,063	1,063	0,03	-15,66	-14,45	7,69
13	1,060	1,060	0,01	-15,80	-14,62	7,47
14	1,048	1,049	0,08	-16,69	-15,48	7,25

Similarmente, os fluxos de potência pelos ramos obtidos através das duas metodologias são apresentados na Tabela 6.14.

Tabela 6.14 – Fluxos de potência pelos ramos

Ramo	Potência Ativa [MW]			Potência Reativa [Mvar]		
	PFD	PFDFC	%	PFD	PFDFC	%
1-2	146,99	172,89	15,0	32,63	29,69	9,9
1-5	72,01	74,5	3,3	2,96	1,42	108,5
2-3	68,76	66,11	4,0	20,4	20,54	0,7
2-4	55,35	49,85	11,0	-5,58	-6,28	11,1
2-5	41,18	35,48	16,1	-10,31	-10,78	4,4

Ramo	Potência Ativa [MW]			Potência Reativa [Mvar]		
	PFD	PFDFC	%	PFD	PFDFC	%
3-4	-25,44	-27,86	8,7	-26,71	-28,58	6,5
4-5	-63,88	-64,19	0,5	-13,72	-14,43	4,9
4-7	29,45	25,62	14,9	-11,75	-11,43	2,8
4-9	16,54	14,75	12,1	-4,68	-4,56	2,6
5-6	41,71	37,5	11,2	-29,78	-29,41	1,3
6-11	6,05	5,39	12,2	6,29	6,18	1,8
6-12	7,52	6,6	13,9	3,18	3,17	0,3
6-13	16,94	15,49	9,4	8,5	8,45	0,6
7-8	0	-1,07	-	-19,59	-19,3	1,5
7-9	29,45	27,5	7,1	5,88	5,92	0,7
9-10	6,45	4,89	31,9	1,52	1,62	6,2
9-14	10,04	8,93	12,4	1,65	1,72	4,1
10-11	-2,55	-2,99	14,7	-4,31	-4,21	2,4
12-13	1,42	1,66	14,5	1,43	1,42	0,7
13-14	4,86	4,79	1,5	3,72	3,65	1,9

Seguidamente, as metodologias do fluxo de carga linearizado *fuzzy* (PFLF), o fluxo de carga de Newton-Raphson *fuzzy* (PFNRF) e a metodologia proposta neste trabalho (PFDFFF) são simuladas para obter solução a este sistema de teste. Na Tabela 6.15 são apresentados os ângulos de fase para as tensões nodais nas barras do tipo PQ do sistema e, na Tabela 6.16 são apresentadas as magnitudes das tensões nas barras do sistema.

Tabela 6.15 Ângulos de fase das tensões

Barra	Ângulos [°]											
	PFLF				PFNRF				PFDFFF			
	a	b	c	STD	a	b	c	STD	a	B	c	STD
2	-5,72	-6,15	-6,58	0,18	-5,92	-5,53	-5,14	0,16	-6,71	-5,79	-4,86	0,38
3	-13,00	-13,97	-14,95	0,40	-13,74	-12,83	-11,93	0,37	-14,77	-13,14	-11,51	0,66
4	-10,70	-11,50	-12,30	0,33	-11,14	-10,40	-9,66	0,30	-12,00	-10,76	-9,53	0,51
5	-9,22	-9,92	-10,61	0,28	-9,59	-8,96	-8,32	0,26	-10,38	-9,25	-8,12	0,46
6	-14,90	-16,02	-17,14	0,46	-15,73	-14,68	-13,64	0,43	-15,92	-14,28	-12,63	0,67
7	-13,91	-14,96	-16,01	0,43	-14,59	-13,62	-12,66	0,40	-15,06	-13,51	-11,97	0,63
8	-13,91	-14,96	-16,01	0,43	-14,59	-13,62	-12,66	0,40	-15,42	-13,39	-11,36	0,83
9	-15,61	-16,78	-17,95	0,48	-16,38	-15,29	-14,20	0,44	-17,06	-15,17	-13,29	0,77
10	-15,88	-17,07	-18,27	0,49	-16,68	-15,57	-14,46	0,45	-16,96	-15,20	-13,44	0,72
11	-15,58	-16,75	-17,93	0,48	-16,39	-15,30	-14,22	0,44	-16,77	-14,84	-12,91	0,79
12	-15,93	-17,13	-18,33	0,49	-16,77	-15,66	-14,54	0,45	-16,97	-15,01	-13,04	0,80
13	-16,09	-17,30	-18,51	0,49	-16,93	-15,80	-14,68	0,46	-16,95	-15,15	-13,36	0,73
14	-17,02	-18,30	-19,59	0,52	-17,88	-16,69	-15,50	0,49	-18,38	-16,11	-13,85	0,93

Tabela 6.16 Magnitudes das tensões nas barras

Barra	Magnitude de Tensão [p.u.]											
	PFLF				PFNRF				PFDF			
	a	b	c	STD	a	b	c	STD	a	b	c	STD
4	-	-	-	-	1,054	1,055	1,056	0,0004	1,029	1,030	1,031	0,0006
5	-	-	-	-	1,060	1,061	1,062	0,0004	1,032	1,034	1,036	0,0007
7	-	-	-	-	1,056	1,057	1,059	0,0006	1,026	1,029	1,031	0,0010
9	-	-	-	-	1,049	1,052	1,054	0,0010	1,010	1,013	1,016	0,0014
10	-	-	-	-	1,048	1,050	1,053	0,0010	1,010	1,013	1,017	0,0014
11	-	-	-	-	1,057	1,058	1,060	0,0006	1,037	1,041	1,044	0,0013
12	-	-	-	-	1,062	1,063	1,063	0,0002	1,060	1,063	1,066	0,0011
13	-	-	-	-	1,059	1,060	1,061	0,0004	1,041	1,044	1,046	0,0010
14	-	-	-	-	1,045	1,048	1,050	0,0010	1,017	1,021	1,025	0,0018

Com as funções de possibilidades obtidas para as variáveis de estado e a formulação de cada uma das metodologias, obtém-se os fluxos de potência ativa e reativa pelos ramos mostrados nas tabelas Tabela 6.17 e Tabela 6.18, respectivamente.

Tabela 6.17 – Fluxos de potência ativa pelos ramos

Ramo	Fluxo de potência ativa [MW]											
	PFLF				PFNRF				PFDF			
	a	b	c	STD	a	b	c	STD	a	b	c	STD
1-2	168,69	181,38	194,08	5,18	167,85	180,52	193,21	5,18	158,59	188,64	218,72	12,27
1-5	72,20	77,62	83,06	2,22	72,90	78,48	84,06	2,28	69,29	79,00	88,72	3,97
2-3	64,12	68,94	73,77	1,97	55,78	67,74	79,70	4,88	44,68	68,22	91,77	9,61
2-4	49,23	52,94	56,64	1,51	40,75	53,04	65,34	5,02	29,93	52,95	75,99	9,40
2-5	35,15	37,80	40,44	1,08	26,64	38,04	49,45	4,66	15,19	37,52	59,86	9,12
3-4	-23,49	-25,26	-27,02	0,72	-44,33	-26,46	-8,59	7,30	-55,64	-25,23	5,19	12,42
4-5	-60,97	-65,55	-70,15	1,87	130,70	-67,03	-3,36	41,21	-171,64	-66,86	37,91	42,77
4-7	26,86	28,87	30,90	0,82	13,78	29,34	44,90	6,35	-0,30	23,79	47,88	9,84
4-9	15,41	16,56	17,73	0,47	10,28	16,47	22,66	2,53	4,03	13,98	23,93	4,06
5-6	39,32	42,27	45,23	1,21	29,62	41,89	54,17	5,01	16,07	35,87	55,68	8,09
6-11	5,97	6,41	6,87	0,18	-15,05	6,16	27,37	8,66	-29,46	5,46	40,40	14,26
6-12	7,03	7,56	8,09	0,22	-9,20	7,54	24,28	6,83	-22,33	5,67	33,68	11,43
6-13	15,90	17,09	18,29	0,49	-15,96	17,00	49,95	13,45	-38,36	13,11	64,58	21,01
7-8	0,00	0,00	0,00	0,00	-22,11	0,00	22,11	9,03	-41,06	-1,38	38,29	16,20
7-9	26,86	28,87	30,90	0,82	-7,05	29,34	65,74	14,86	-29,40	27,43	84,27	23,20
9-10	5,66	6,09	6,51	0,17	-43,88	6,34	56,57	20,50	-76,79	0,54	77,88	31,57
9-14	9,16	9,85	10,54	0,28	-6,30	9,96	26,23	6,64	-21,51	6,28	34,07	11,35
10-11	-2,71	-2,91	-3,12	0,08	-24,88	-2,66	19,57	9,07	-38,85	-3,48	31,90	14,44
12-13	1,36	1,46	1,56	0,04	-20,57	1,44	23,45	8,99	-35,02	1,41	37,83	14,87
13-14	4,70	5,05	5,40	0,14	-7,97	4,94	17,85	5,27	-16,62	5,13	26,88	8,88

Tabela 6.18 – Fluxos de potência reativa pelos ramos

Ramo	Fluxo de Potência Reativa [Mvar]											
	PFLF				PFNRF				PFDFP			
	a	b	c	STD	a	b	c	STD	a	b	c	STD
1-2	-	-	-	-	31,40	32,63	33,86	0,50	33,39	33,43	33,46	0,01
1-5	-	-	-	-	1,62	2,96	4,29	0,55	15,90	15,92	15,95	0,01
2-3	-	-	-	-	18,87	20,40	21,94	0,63	20,43	20,46	20,49	0,01
2-4	-	-	-	-	-7,17	-5,58	-3,98	0,65	9,18	9,20	9,23	0,01
2-5	-	-	-	-	-11,58	-10,31	-9,03	0,52	5,79	5,81	5,83	0,01
3-4	-	-	-	-	-28,03	-26,71	-25,40	0,54	-13,02	-13,00	-12,98	0,01
4-5	-	-	-	-	-20,14	-13,72	-7,30	2,62	-10,22	-10,12	-10,02	0,04
4-7	-	-	-	-	-13,82	-11,75	-9,68	0,85	-9,82	-9,79	-9,76	0,01
4-9	-	-	-	-	-5,84	-4,68	-3,53	0,47	-2,16	-2,14	-2,13	0,01
5-6	-	-	-	-	-31,45	-29,78	-28,11	0,68	-39,06	-39,04	-39,01	0,01
6-11	-	-	-	-	5,35	6,29	7,23	0,38	15,87	15,89	15,91	0,01
6-12	-	-	-	-	2,63	3,18	3,73	0,22	2,96	2,97	2,99	0,01
6-13	-	-	-	-	7,12	8,50	9,89	0,57	21,74	21,77	21,79	0,01
7-8	-	-	-	-	-20,44	-19,59	-18,75	0,34	-35,79	-35,77	-35,76	0,01
7-9	-	-	-	-	1,07	5,88	10,70	1,97	15,13	15,20	15,27	0,03
9-10	-	-	-	-	-4,70	1,52	7,74	2,54	-0,31	-0,23	-0,15	0,03
9-14	-	-	-	-	-0,61	1,65	3,91	0,92	-2,97	-2,93	-2,90	0,01
10-11	-	-	-	-	-6,41	-4,31	-2,21	0,86	-14,47	-14,43	-14,40	0,02
12-13	-	-	-	-	0,56	1,43	2,31	0,36	10,27	10,30	10,33	0,01
13-14	-	-	-	-	2,53	3,72	4,91	0,49	6,83	6,86	6,88	0,01

As perdas ativas foram desconsideradas para o sistema de 14 barras, pois a resistência dos ramos foi desconsiderada de forma a amplificar o efeito de elevado X/R desejado.

Para os sistemas simulados, os pontos centrais das distribuições de possibilidades ficaram próximos aos valores calculados nos métodos tradicionais não *fuzzy*, com exceção para o fluxo de potência reativa. Em outras palavras, os pontos centrais das funções de possibilidades triangular das variáveis de estado se aproximaram aos valores obtidos usando métodos determinísticos, menos para o fluxo de potência reativa que repetiu o comportamento ocorrido no sistema de 6 barras e não apresentou valores centrais semelhantes ao método PFNRF, porém apresentou um desvio padrão bem reduzido.

O método proposto (PFDFP) neste trabalho apresentou mínimas imprecisões nas magnitudes de tensão e grandes imprecisões nos ângulos de fase, sendo que os fluxos de potência nos ramos apresentaram incertezas menores ou da mesma ordem do que o método PFNRF.

Capítulo 7

Conclusões e trabalhos futuros

Este trabalho teve como principal objetivo desenvolver um método para consideração das incertezas na solução do fluxo de carga. Sendo que estas incertezas foram representadas por distribuições de possibilidades *fuzzy*.

Iniciou-se por estudar métodos já utilizados em outros trabalhos da literatura técnica, analisar suas possibilidades de aplicação e buscar um método que envolvesse em menor proporção o uso da aritmética *fuzzy*, pois observaram-se muitas discussões ao respeito mostrando a necessidade de novas ferramentas que visem a sua aplicação prática na solução do fluxo de carga no âmbito do dia a dia de uma concessionária de energia, por exemplo.

Partiu-se do trabalho apresentado em [6], onde parte da solução foi realizada utilizando-se de um sistema de inferência *fuzzy* com entradas e saídas *crisp*, e a partir daí, modificações foram realizadas para que o sistema pudesse receber entradas *fuzzy* e fornecesse as imprecisões de saída, ou seja, saídas em formato de distribuições de possibilidade *fuzzy*, o que estabeleceu uma nova metodologia de análise para o problema de fluxo de carga com incertezas.

Apesar do método proposto utilizar o sistema de inferência como parte da solução, ainda é necessário a solução de equações utilizando aritmética *fuzzy* para a atualização das potências calculadas em cada iteração, isto agrega incertezas que se sobrepõem conforme foi descrito anteriormente. Porém, os resultados dos fluxos de potência nos ramos mostraram-se bem comportados, com uma faixa incertezas dentro do esperado se comparado com os demais métodos. Sendo que, apesar de estipularmos desvios na entrada relativamente pequenos, da ordem de 5 a 7% do valor central, estes desvios se propagam a cada iteração devido às condições não lineares do problema e que se agravam ao ser realizado operações aritméticas *fuzzy* podendo resultar em distribuições de possibilidades triangulares com uma base ampla.

Vale ressaltar que o uso das funções de pertinência em formato triangular, mostrou-se prático para este tipo de aplicação, devido à maior simplicidade na representação e nas operações aritméticas exigidas.

As bibliotecas disponíveis para uso na linguagem de programação Python mostraram-se mais flexíveis, com maior número de operações e funções do que a toolbox *fuzzy* disponível para o Matlab©. Agregando-se a vantagem do Python e suas bibliotecas serem de código aberto.

Enfim, os resultados foram promissores, para uso na operação e/ou planejamento da rede de transmissão do sistema elétrico. Sendo que para uma análise rápida, pode ser utilizado o método linearizado e para uma análise mais acurada, os métodos PFNRF ou PFDFF podem ser utilizados.

Quando considerado um sistema com alta relação X/R, a metodologia proposta (PFDFF) se mostrou capaz de gerar resultados próximos do esperado em um fluxo de carga convencional e com um intervalo de incertezas menores ou da mesma ordem que o PFNRF.

Como proposta de trabalhos futuros, cabe testar a metodologia proposta para sistemas de maior porte. Analisar a possibilidade de alterações no algoritmo visando aplicar o método a sistema de média tensão onde o X/R é costumeiramente menor, isso talvez poderia ser feito com auxílio de um parâmetro de escala variável na definição da largura dos incrementos de potência dentro do processo iterativo do PFDFF. Também sugere-se realizar testes com funções de pertinências diferentes das triangulares, por exemplo trapezoidais e/ou gaussianas, para verificar a influência dessa suposição na convergência do algoritmo proposto.

Referências Bibliográficas

- [1] W. D. Stevenson, Elementos de análise de sistemas de potência, McGraw-Hill do Brasil, 1974.
- [2] M. V. X. Dias, E. d. C. BORTONI e J. Haddad, “Geração distribuída no Brasil: oportunidades e barreiras,” *Revista Brasileira de Energia*, vol. 11, p. 1–11, 2005.
- [3] A. J. Monticelli, Fluxo de carga em redes de energia elétrica, E. Blucher, 1983.
- [4] J. T. Saraiva, V. Miranda e M. Matos, “Fuzzy load flow-new algorithms incorporating uncertain generation and load representation,” em *Proc. 10 th Power Systems Computing Conference*, pp.621-627, Graz, Austria, 1990.
- [5] V. Miranda e M. A. C. C. Matos, “Distribution system planning with fuzzy models and techniques,” em *10th International Conference on Electricity Distribution, 1989. CIRED 1989*, 1989.
- [6] J. G. Vlachogiannis, “Fuzzy logic application in load flow studies,” *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, vol. 148, p. 34–40, 2001.
- [7] Z. A. Ayub, “Load Flow Analysis Uncertainty Treatment Via Fuzzy Arithmetic,” Universiti Teknologi Malaysia, Ph.D. dissertation, 2009.
- [8] M. Cortés-Carmona, R. Palma-Behnke e G. Jimenez-Estevez, “Fuzzy load flow based on α -cuts arithmetics,” em *2007 39th North American Power Symposium*, 2007.
- [9] M. M. P. Lima, C. A. F. Murari e M. A. Pereira, “Uma nova metodologia para fluxos de carga fuzzy,” *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica*, vol. 14, p. 69–75, 2003.

- [10] V. Calderaro, F. Lamberti, V. Galdi e A. Piccolo, “Power flow problems with nested information: An approach based on fuzzy numbers and possibility theory,” *Electric Power Systems Research*, vol. 158, p. 275–283, 2018.
- [11] L. A. Zadeh, *Fuzzy sets. Information and Control*, Vol. 8, pp. 338–353, 1965.
- [12] M. J. Dos Santos, “Modelagem de incertezas no problema de fluxo de potência,” Tese de D. Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.
- [13] M. A. Matos e E. M. Gouveia, “The fuzzy power flow revisited,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 23, p. 213–218, 2008.
- [14] R. Kenarangui e A. Seifi, “Fuzzy power flow analysis,” *Electric power systems research*, vol. 29, p. 105–109, 1994.
- [15] D. J. Dubois, *Fuzzy sets and systems: theory and applications*, vol. 144, Academic press, 1980.
- [16] P. Gajalakshmi e S. Rajesh, “Fuzzy modeling of power flow solution,” em *INTELEC 07-29th International Telecommunications Energy Conference*, 2007.
- [17] L. Foulloy e S. Galichet, “Fuzzy control with fuzzy inputs,” *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 11, p. 437–449, 2003.
- [18] D. Driankov, R. Palm e H. Hellendoorn, “Fuzzy control with fuzzy inputs: The need for new rule semantics,” em *Proceedings of 1994 IEEE 3rd International Fuzzy Systems Conference*, 1994.
- [19] G. C. Mouzouris e J. M. Mendel, “Nonsingleton fuzzy logic systems: theory and application,” *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 5, p. 56–71, 1997.
- [20] K. L. Lo, Y. J. Lin e W. H. Siew, “Fuzzy-logic method for adjustment of variable parameters in load-flow calculation,” *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, vol. 146, p. 276–282, 1999.
- [21] V. Miranda e J. P. Saraiva, “Fuzzy modelling of power system optimal load flow,” *IEEE*

Transactions on Power Systems, vol. 7, p. 843–849, 1992.

- [22] J. T. Saraiva, V. Miranda e M. A. C. C. Matos, “Generation and load uncertainties incorporated in load flow studies,” em *[1991 Proceedings] 6th Mediterranean Electrotechnical Conference*, 1991.
- [23] P. R. Bijwe e G. V. Raju, “Fuzzy distribution power flow for weakly meshed systems,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, p. 1645–1652, 2006.
- [24] Y.-Y. Hong e Z.-T. Chao, “Development of energy loss formula for distribution systems using FCN algorithm and cluster-wise fuzzy regression,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 17, p. 794–799, 2002.
- [25] “Fuzzy inference systems,” Princeton University, [Online]. Available: <https://www.cs.princeton.edu/courses/archive/fall07/cos436/HIDDEN/Knapp/fuzzy004.htm>. [Acesso em 23 09 2020].