

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

HEITOR HUGO DIAS MANGUEIRA

Uma abordagem nebulosa para avaliar o impacto de geradores independentes eólicos no despacho integrado do sistema

São Luís

2005

HEITOR HUGO DIAS MANGUEIRA

Uma abordagem nebulosa para avaliar o impacto de geradores independentes eólicos no despacho integrado do sistema

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Sistemas de Energia Elétrica da UFMA, como requisito para a obtenção parcial do grau de MESTRE em Sistemas de Energia Elétrica.

Orientador: Osvaldo Ronald Saavedra Mendez

Doutor

Co-orientadora: Maria da Guia da Silva

Doutora

São Luís

2005

Mangueira, Heitor Hugo Dias

Uma abordagem nebulosa para avaliar o impacto de geradores independentes eólicos no despacho integrado do sistema / Heitor Hugo Dias Mangueira - 2005

86.p

1.Números Nebulosos 2.Fluxo de Carga Nebuloso 3. Geração Distribuída 4.Geração Eólica 5. Sistemas Nebulosos Não-linear.

I.Título.

CDD XXX.X

CDU XXX.X

HEITOR HUGO DIAS MANGUEIRA

Uma abordagem nebulosa para avaliar o impacto de geradores independentes eólicos no despacho integrado do sistema

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Sistemas de Energia Elétrica da UFMA, como requisito para a obtenção parcial do grau de MESTRE em Sistemas de Energia Elétrica.

Submetida em 12 de Junho de 2005

BANCA EXAMINADORA

Oswaldo Ronald Saavedra Mendez

Doutor

Maria da Guia da Silva

Doutora

André Nunes de Souza

Doutor

Omar Andres Carmona Cortez

Doutor

À “*Xavier*” e “*Tempestade*”.

À *DEUS*.

Resumo

Neste trabalho, a propagação das incertezas dos sistemas de geração eólica em redes elétricas convencionais é avaliada. As fontes de energia eólica são modeladas utilizando conjuntos nebulosos para incluir a incerteza intrínseca da velocidade do vento. O estudo utiliza um fluxo de potência nebuloso multi-linearizado. Testes têm sido desenvolvidos utilizando um sistema real de distribuição de 16 barras. Os resultados obtidos mostram uma correlação interessante entre a topologia da rede de distribuição e a propagação da incerteza da geração eólica. Este método pode ser benéfico, por exemplo, para o operador do sistema a fim de definir a reserva necessária para garantir o balanço de carga. Por outro lado, pode ser proveitoso como um indicador de que barras são pouco afetadas pela incerteza. Uma proposta para decomposição de números nebulosos com alto grau de incerteza utilizados para solução de sistemas nebulosos não-lineares também é apresentada. O procedimento é baseado na propriedade associada com números nebulosos incrementais, a qual citada neste trabalho. A propriedade mostra uma melhoria da qualidade da solução em processos de linearização associados a métodos iterativos, como o Método de Newton. A metodologia é validada através de um estudo de caso utilizando o cálculo de fluxo de carga nebuloso. Discussões, comentários e conclusões relevantes são também incluídos.

Palavras-chaves: Sistemas nebulosos não-lineares, números nebulosos, fluxo de carga nebuloso, geração distribuída, geração eólica.

Abstract

In this work, the propagation of uncertainties of the wind generation systems on the conventional electric network is evaluated. Wind power sources are modelled by using fuzzy sets as to include the wind's speed intrinsic uncertainty. The study uses a multi-linearized fuzzy power flow. Tests have been performed using a 16-bus real-life distribution system. Results obtained show an interesting correlation among network topology and the spread of wind generation uncertainty. This procedure can be useful, for instance, for the system operator in order to define the reserve necessary to guarantee the load balancing. On the other hand, it may be useful as indicator of which buses are little affected by uncertainty. A proposal is presented for the decomposition of large uncertainties associated with fuzzy numbers to be used in the solution of non linear fuzzy systems. The procedure is based on a property associated with incremental fuzzy numbers which is stated in this paper. This property allows the improvement of the solution quality in linearization process associated to iterative methodologies, such us Newton's method. The methodology is validated through a case study using the fuzzy power flow calculation. Discussion, comments and relevant conclusions are also included.

Keywords: Non linear fuzzy system, fuzzy numbers, fuzzy load flow, distributed generation, wind generation.

Agradecimentos

A Minha Família, pelo incentivo e sem os quais eu não poderia ter alcançado mais este objetivo;

Ao Prof. Osvaldo Saavedra pela orientação, amizade e principalmente, pela paciência, sem a qual este trabalho não se realizaria;

À Prof. Maria da Guia da Silva, sempre presente;

À Companhia Energética do Maranhão (CEMAR), pelo apoio ao ceder dados do sistema de distribuição que enriqueceram o conteúdo deste trabalho.

Aos Professores do Curso de Pós-graduação, pelo conhecimento transmitido durante todo este período;

Aos Amigos do Grupo de Sistema de Potência, pela colaboração no decorrer do trabalho;

Aos Amigos do Curso de pós-graduação, companheiros desta longa caminhada.

“... todo amor é sagrado e o fruto do trabalho é mais que sagrado... Lembra que o sono é sagrado e alimenta de horizonte o tempo acordado de viver”.

Beto Guedes

Sumário

Lista de Figuras	9
Lista de Tabelas	11
1 Introdução	12
2 Incorporação de gerações intermitentes em mercados de energia	16
2.1 Geração intermitente	16
2.2 Mercado brasileiro	16
2.3 Mercado CAISO	19
2.3.1 Geradores eólicos como participantes no mercado convencional . . .	19
2.3.2 Programa de participação de geradores intermitentes	20
2.3.3 Penalidade por variação não-programada	21
2.3.4 Despacho de energia hora-hora e dia-dia	21
2.3.5 Serviço de previsão	21
2.3.6 Comentários	22
3 Fluxo de potência nebuloso multi-linearizado	23
3.1 Análise de fluxo de potência	23
3.2 Fluxo de potência nebuloso	24
3.2.1 Cargas e gerações nebulosas	25
3.2.2 Fluxo de carga nebuloso incremental	26
3.2.3 Fluxo de carga não-linear nebuloso	26
3.3 Decomposição de incertezas	29

3.4	Propriedade	30
3.5	Descrição do método	31
3.6	Multi-linearização	33
3.6.1	Distribuição dos fluxos de potência ativa e reativa	34
3.6.2	Injeções de potência nas barras de folga e PV	35
3.6.3	Distribuição de perdas	36
3.6.4	Comentários	36
4	Sistema nebuloso	37
4.1	Fuzzificador	38
4.1.1	Fuzzificador baseado em interface lingüística	38
4.1.2	Fuzzificador baseado em intervalos de incerteza	40
4.2	Regras	40
4.3	Inferência	41
4.4	Defuzzificador	41
4.4.1	Defuzzificador baseado em interface lingüística	42
4.4.2	Defuzzificador baseado em valores precisos	44
4.5	Comentários	44
5	Estudo de casos: performance do método e incorporação de geradores eólicos na rede convencional	46
5.1	Performance do modelo multi-linearizado	46
5.1.1	Sistema 2 barras	47
5.1.2	Sistema 30 barras	49
5.1.3	Observações	51
5.2	Propagação da incerteza	52
5.2.1	Sistema 16 barras	52

5.2.2	Propagação da incerteza via linguagem natural	55
5.3	Impacto no despacho do sistema	57
6	Conclusões	65
A	Apêndice	67
A.1	Conjuntos nebulosos	67
A.1.1	Função de pertinência	67
A.1.2	Tipos de funções de pertinência	67
A.1.3	Definição conjuntos nebulosos	69
A.1.4	Propriedades de conjuntos nebulosos	71
A.2	Definição de números nebulosos	72
A.2.1	Operações aritméticas com números nebulosos	73
A.2.2	Cortes α	74
B	Apêndice	76
	Referências Bibliográficas	88

Lista de Figuras

2.1	Mapa eólico brasileiro	17
2.2	Sazonalidade complementar	19
3.1	Descrição nebulosa de uma carga (P,Q)	25
3.2	Número trapezoidal	30
3.3	Número trapezoidal incremental	30
3.4	Decomposição do número nebuloso	30
3.5	Exemplo ilustrativo da aproximação por multi-linearização	32
4.1	Sistema nebuloso	37
4.2	Incerteza base representada por um número nebuloso triangular	38
4.3	Conjuntos nebulosos associados aos modificadores lingüísticos	39
4.4	Número nebuloso trapezoidal representando a incerteza composta	39
4.5	Conjunto nebuloso de entrada	40
4.6	Conjuntos nebulosos representando o novo modificador lingüístico	43
4.7	Conjunto nebuloso de saída	44
5.1	Sistema 2 barras	47
5.2	Geração eólica ativa nebulosa - \tilde{P}_W	52
5.3	Geração eólica reativa nebulosa - \tilde{Q}_W	53
5.4	Sistema 16 barras modificado	53
5.5	Propagação da incerteza	55
5.6	Geração eólica ativa nebulosa - \tilde{P}_W	55
5.7	Geração eólica reativa nebulosa - \tilde{Q}_W	55

5.8	Geração ativa nebulosa na barra de folga - \tilde{P}_{FOLGA}	56
5.9	Geração ativa nebulosa na barra de folga - \tilde{P}_{FOLGA}	57
A.1	Funções de pertinência típicas	68
A.2	União: (a) conjuntos nebulosos; (b) conjuntos determinísticos	72
A.3	Interseção: (a) conjuntos nebulosos; (b) conjuntos determinísticos	72
A.4	Complemento: (a) conjuntos nebulosos; (b) conjuntos determinísticos	72
A.5	Número nebuloso	73
A.6	Função de pertinência trapezoidal	74
A.7	Corte α	75

Lista de Tabelas

5.1	Distribuição de possibilidades dos ângulos ($^{\circ}$) - Linearização clássica	47
5.2	Distribuição de possibilidades dos ângulos ($^{\circ}$) - Multi-linearização	48
5.3	Avaliação determinística não-linear para os pontos extremos ($^{\circ}$)	48
5.4	Distribuição de possibilidades dos ângulos sistema IEEE30 ($^{\circ}$) - Linearização clássica	49
5.5	Distribuição de possibilidades das tensões sistema IEEE30 (pu) - Linearização clássica	49
5.6	Distribuição de possibilidades dos ângulos sistema IEEE30 ($^{\circ}$) - Multi-linearização	50
5.7	Distribuição de possibilidades das tensões sistema IEEE30 (pu) - Multi-linearização	50
5.8	Avaliação determinística não-linear para os pontos extremos	51
5.9	Sistema 16 barras - CEMAR	60
5.10	Fluxo de potência determinístico (MW/MVAr) obtido nos testes.	61
5.11	Distribuições de possibilidades para os fluxos de potência ativa	62
5.12	Distribuições de possibilidades para os fluxos de potência reativa	63
5.13	Potência versus perdas	64
5.14	Caracterização da incerteza da geração de potência ativa na barra de folga	64
5.15	Incerteza versus carga	64

1 Introdução

A utilização de alternativas energéticas a partir do aproveitamento de fontes renováveis de energia como solar, eólica, biomassa e pequenas centrais hidroenergéticas é hoje uma realidade incontestável na medida em que estas tecnologias estão se tornando mais competitivas, tanto para sistemas isolados de energia como para a complementaridade de atendimento aos centros urbanos, tratando-se de tecnologias limpas de grande alcance social.

A preocupação com a preservação e utilização de recursos naturais em benefício do desenvolvimento sustentável é, sem dúvida, uma das prioridades do novo século. Além disto, a considerável disponibilidade de tais recursos renováveis existentes no Brasil, devido às suas condições geográficas privilegiadas, sinalizam para a utilização em larga escala destas energias com todas as suas significativas vantagens sociais, ambientais, econômicas e estratégicas.

Vários tipos de geração distribuída, tais como turbinas eólicas, micro-turbinas, células combustíveis e sistemas solares, têm aumentado a sua penetração tornando o impacto significativo no despacho econômico e conveniente problema na confiabilidade do sistema. O despacho de algumas destas unidades geradoras é de natureza estocástica, com sua capacidade dependente da previsão do vento e de insolação.

Fontes de energia renovável, especialmente as eólicas, têm alcançado grande relevância devido a dois aspectos importantes: por um lado, os avanços tecnológicos nas turbinas e seu controle e, por outro lado, no caso Brasileiro, dada a crise de energia, que coloca o país confinado em um colapso energético. Além do mais, o processo de desregulamentação do setor elétrico é encorajador ao estabelecimento de produtores independentes, em particular os geradores eólicos. A comercialização desta classe de energia tem sido regulamentada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Atualmente, a energia eólica é atrativa por ser provida diretamente no nível da distribuição, reduzindo as perdas na transmissão e contribuindo para a preservação no nível de reserva das plantas hidroelétricas. Contudo, a geração eólica apresenta incertezas intrínsecas devido sua dependência peculiar da velocidade do vento. Esta incerteza é

refletida, com vários graus de intensidade, para os geradores convencionais. Por outro lado, as concessionárias estão interessadas em conhecer os níveis de geração de energia esperados pelos grupos de produtores independentes. Esta questão é um novo desafio para o planejamento e operação das concessionárias.

Outro desafio é provido da indicação da energia firme que será garantida pelo produtor eólico para suprir uma determinada carga. Dessa forma, a geração proveniente de sistemas eólicos não pode ser controlada devido a variações na velocidade do vento, alguns sistemas de previsão da velocidade do vento para a geração de energia convém serem avaliados. O tempo típico para a previsão é de 2 a 3 dias [1]. Basicamente, previsões da velocidade do vento para mais que 3 horas a frente são baseadas em previsões numéricas fornecidas de acordo com os serviços meteorológicos. Contudo, estes sistemas de previsão são incapazes de capturar uma informação não estocástica, subjetiva e de natureza atípica.

As teorias mais conhecidas para tratar da imprecisão e da incerteza são respectivamente a teoria dos conjuntos e a teoria de probabilidades. Estas teorias nem sempre conseguem captar a riqueza na informação fornecida por seres humanos. A teoria dos conjuntos não é capaz de tratar o aspecto vago da informação e a teoria de probabilidades é mais adequada ao tratamento de informações que ocorram com uma determinada frequência do que fornecidas por seres humanos. [2]

A teoria dos conjuntos nebulosos foi desenvolvida por Lotfi Zadeh, a partir de 1965 [3], para tratar do aspecto vago da informação. Em 1978 [4], desenvolveu-se a teoria de possibilidades, que trata a incerteza da informação, podendo ser comparada com a teoria de probabilidades que, ao contrário desta, é bastante adequada ao tratamento de informações fornecidas por seres humanos. O fato é que, mesmo em discurso usual, percebemos que a noção de possibilidades é menos restritiva que aquela de probabilidade: é mais fácil dizer que algum evento é possível do que provável.

A teoria dos conjuntos nebulosos e a teoria de possibilidades estão intimamente ligadas. Fato este, muito importante no sentido de que é possível se tratar tanto a imprecisão quanto a incerteza de um conjunto de informações em um único ambiente formal, pois a maior parte do tempo não é necessário fazer a distinção entre um conjunto nebuloso e uma distribuição de probabilidades.

Assim, o número nebuloso é uma forma de representação da incerteza associada a geração eólica de maneira estática. Conseqüentemente, o fluxo de potência convém ser

também nebuloso.

Na bibliografia relatada, alguns artigos tratam da análise de fluxo de potência com incertezas, dentre elas podem-se citar três aproximações:

- Métodos Probabilísticos;
- Análise de Intervalos;
- Métodos de Fluxo de Carga Nebuloso.

Vários trabalhos de análise de probabilidade têm sido reportados [5]-[6]. A aritmética de intervalos tem sido apresentada por Alvarado, *et al.* [7]. Na terceira categoria, vários trabalhos envolvendo o tratamento de cargas como números nebulosos têm sido publicados, obtendo como resultados as distribuições de possibilidades das tensões, em módulo e fase, e dos fluxos de potência. Em [8] e [9] são apresentadas aproximações baseadas em uma linearização de uma solução determinística. Em [12], o fluxo de potência por injeções nebulosas é formulado como um problema de otimização com restrições baseadas em cortes α . Para solução deste problema uma aproximação multi-linearizada é sugerida.

O principal obstáculo é que as equações de fluxo de potência são resolvidas por processos iterativos e a estimação da distribuição de possibilidades das variáveis de estado, fluxo de potência e perdas dependem da qualidade da linearização do ponto de operação atual. É reconhecido que em sistemas mais estressados, há falhas no modelo de linearização, e soluções obtidas por eles, não refletem o comportamento do sistema.

Neste trabalho é apresentada a avaliação do impacto de produtores eólicos em redes elétricas convencionais, modelando estes como números nebulosos. Estes números nebulosos representam, sob o ponto de vista qualitativo, o nível de geração em um dado instante do tempo. O impacto nos geradores convencionais é avaliado, sob o ponto de vista estático, utilizando-se um fluxo de potência nebuloso. Este cálculo é desenvolvido utilizando-se um modelo multi-linearizado que permite melhorar a solução das distribuições de possibilidades das variáveis de estado, fluxos de potência e perdas do sistema. A aproximação é baseada em uma propriedade que trata números nebulosos com um grau de incerteza menor que o original [13] [14] [15]. Para determinar o caso base, o

Método de Newton-Raphson é utilizado. Os resultados dos testes são apresentados para três perfis de cargas.

O presente trabalho está dividido em seis capítulos, onde o primeiro corresponde a esta introdução.

No segundo capítulo apresenta-se o cenário de gerações com características intermitentes dentro do mercado de energia, citando o estudo de caso da California Independent System Operator (CAISO).

No terceiro capítulo refere-se a uma análise do comportamento de um sistema elétrico, para o tratamento da informação de caráter impreciso e vago, utilizando a teoria de conjuntos nebulosos. Uma proposta de decomposição de números nebulosos para soluções de problema nebulosos não-linear é apresentada.

No quarto capítulo apresenta-se a composição de um sistema nebuloso baseado em regras e no sistema de inferência nebulosa capaz de absorver uma informação determinística na entrada, convertê-la em nebulosa e refleti-la, no bloco de saída, em informações nebulosas que, dependendo do sistema e do tipo informação a ser extraída, podem ser, ainda, convertidas em informações precisas.

No quinto capítulo é exposto os testes e a análise dos resultados. Três diferentes discussões são apresentadas.

O sexto capítulo refere-se às conclusões e recomendações do trabalho.

2 Incorporação de gerações intermitentes em mercados de energia

Este capítulo procura abordar o mercado de energia tendo em vista a incorporação de gerações intermitentes. Os cenários, oportunidades e ameaças para o mercado de energia também serão tratados.

2.1 Geração intermitente

Uma geração intermitente é aquela que possui sua fonte de energia primária não-controlada. Para o caso da geração eólica tem-se a velocidade dos ventos como uma variável não-controlada.

Uma das principais características de uma geração intermitente é não ser despachável, ou seja, estas fontes de energia não garantem níveis de geração de modo a suprir plenamente a demanda do sistema para um determinado período de tempo [26]. Outro aspecto importante é a necessidade de uma reserva girante capaz de complementar a demanda de energia contratada no caso de uma contingência.

2.2 Mercado brasileiro

Entre as gerações intermitentes, no Brasil já existem as fazendas de eólicas. Comparadas com as grandes usinas a gás, as renováveis são mais rápidas, funcionam em instalações menos complicadas de construir, mais baratas (porque não dependem de combustíveis cada vez mais escassos) e mais limpas porque não poluem o ar.

Diante das circunstâncias do racionamento de energia elétrica, principalmente na região Nordeste, a introdução de geradores eólicos à rede pode impulsionar o mercado de energia no Brasil, tornando-o mais competitivo e diversificando a matriz energética.

No Brasil, embora o aproveitamento dos recursos eólicos tenha sido feito

tradicionalmente com a utilização de cataventos multipás para bombeamento d'água, algumas medidas precisas de vento, realizadas recentemente em diversos pontos do território nacional, indicam a existência de um imenso potencial eólico ainda não explorado. A Figura 2.1 mostra o mapa eólico brasileiro.

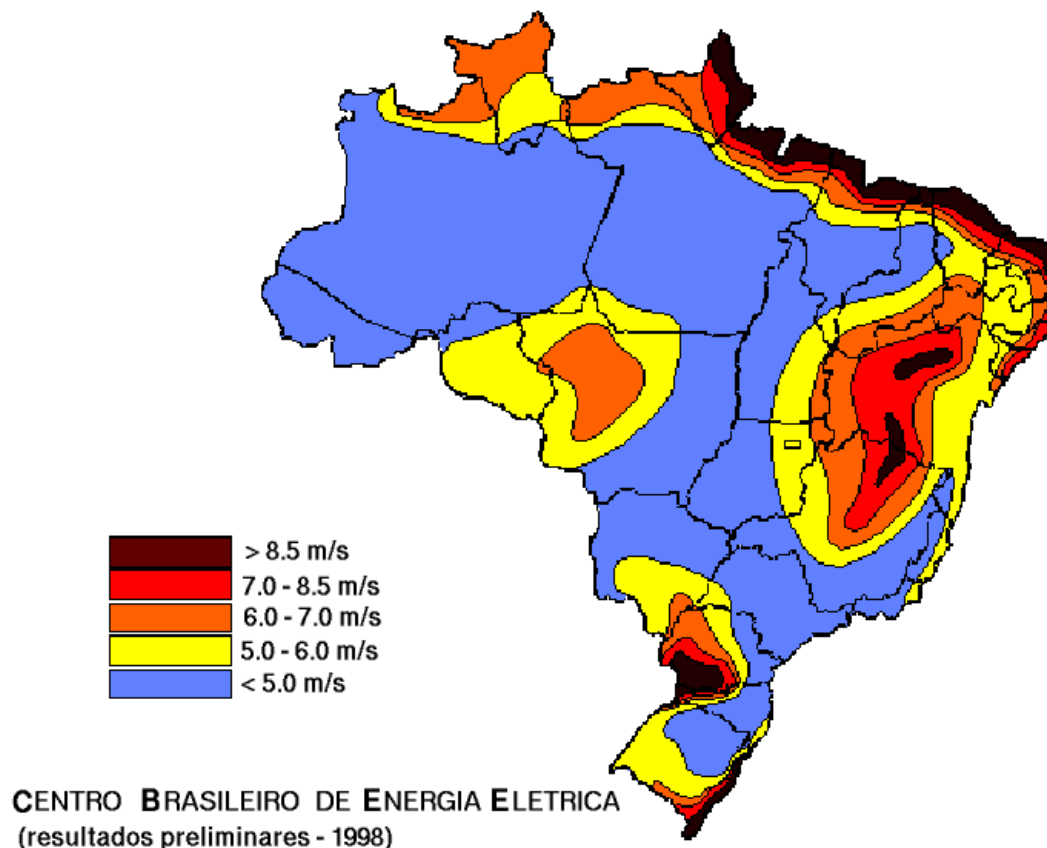


Figura 2.1: Mapa eólico brasileiro

Grande atenção tem sido dirigida para o Estado do Ceará por este ter sido um dos primeiros locais a realizar um programa de levantamento do potencial eólico através de medidas de vento. Entretanto, não foi apenas na costa do Nordeste que áreas de grande potencial eólico foram identificadas. No Rio Grande do Norte, Minas Gerais, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul também possuem fazendas eólicas instaladas.

Nos últimos anos, do ponto de vista da inclusão de geradores eólicos em sistemas de energia elétrica, alguns tópicos estão sendo discutidos, tais como: as novas técnicas de construção de aerogeradores, a conexão à rede de transmissão, os aspectos da comercialização e regulamentação do setor elétrico, as regras internacionais de medição de ventos e principalmente como planejar um projeto de energia eólica envolvendo os riscos do negócio e os diversos contratos.

No nordeste brasileiro, a falta de chuvas é um dos grandes impecilhos para o pleno funcionamento de hidroelétricas. Os aerogeradores poderiam ser utilizados como uma forma suplementar de geração de energia elétrica. Assim, a geração eólica seria uma grande oportunidade para redução da vazão dos reservatórios, podendo estes retornarem ao nível normal. No Brasil, o período de escassez de chuvas é compreendido pela existência dos melhores ventos, assim como, no período de maior volume pluviométrico são registrados ventos de menor intensidade, tal fenômeno é conhecido como sazonalidade complementar, [27].

A Figura 2.2 mostra o estudo do Rio São Francisco. Para este caso específico, a energia eólica poderá também resolver o grande dilema do uso mútuo da água (água para gerar eletricidade versus água para irrigação). Grandes projetos de irrigação às margens do rio e/ou envolvendo a transposição das águas do rio para outras áreas podem causar um grande impacto no volume de água dos reservatórios das usinas hidrelétricas e, conseqüentemente, prejudicar o fornecimento de energia para a região. Entretanto, observando o gráfico abaixo, percebe-se que as maiores velocidades de vento no nordeste do Brasil ocorrem justamente quando o fluxo de água do Rio São Francisco é mínimo. Logo, as centrais eólicas instaladas no nordeste poderão produzir grandes quantidades de energia elétrica evitando que se tenha que utilizar a água do rio São Francisco.

No Brasil, o Programa de Incentivo as Fontes Alternativas (PROINFA), tem como principal objetivo diversificar a matriz energética, reduzindo a dependência de fontes hidráulicas, aumentando a participação da energia elétrica produzida por empreendimentos de produtores independentes, concebido com base em fontes eólica, pequenas centrais hidrelétricas e biomassa.

Neste sentido, o Operador Nacional do Sistema (ONS) é obrigado a realizar o despacho de energia considerando as variações causadas pela entrada/saída destes geradores ou, ainda, quando do não cumprimento dos contratos de venda de energia, ou seja, uma indisponibilidade de geração conforme a contratada.

Devido aos problemas enfrentados nos últimos anos quanto a disponibilidade de geração de energia, levando o País a adotar o programa de racionamento e do incentivo às fontes renováveis, em gerar uma energia “limpa”, não existe uma regulamentação bem definida para o despacho integrado do sistema considerando este tipo de geração.

Dessa forma, gerou-se a necessidade de pesquisar sistemas onde o despacho

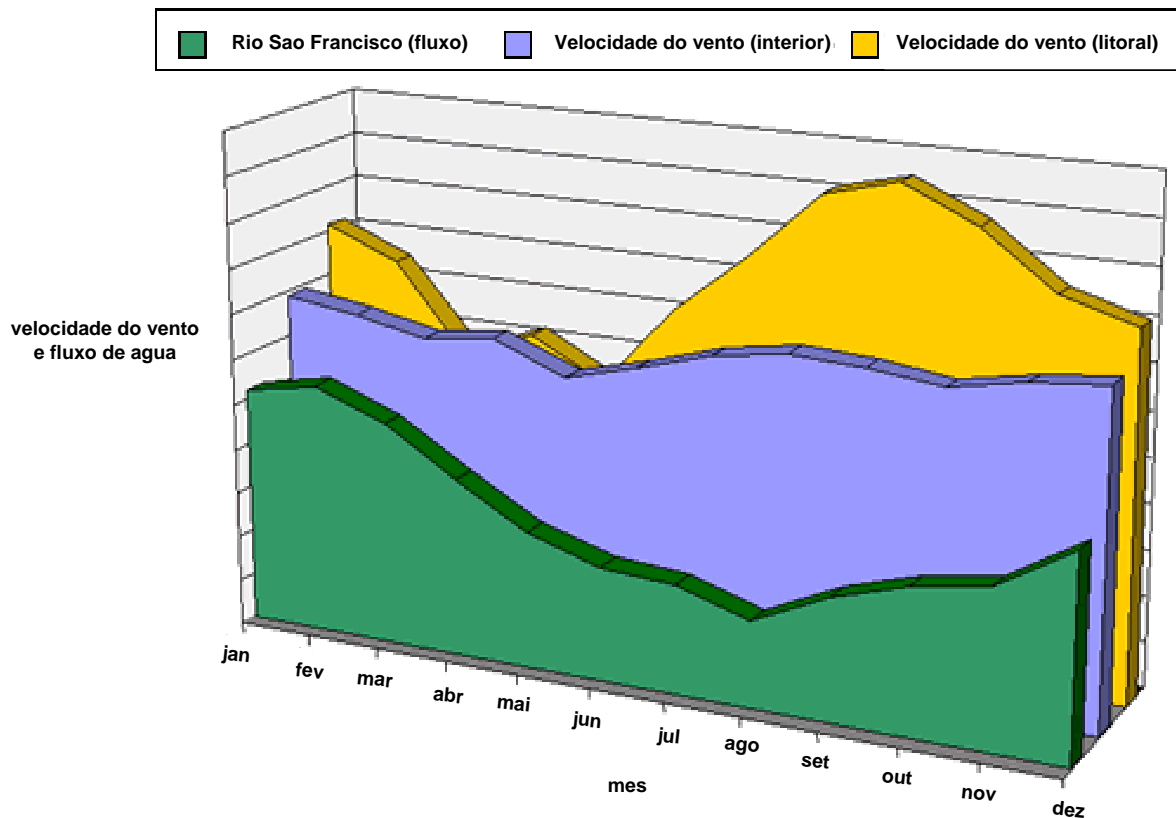


Figura 2.2: Sazonalidade complementar

integrado levasse em conta estas gerações intermitentes. Assim, utiliza-se a experiência do California Independent System Operator (CAISO) para estudo.

2.3 Mercado CAISO

Nesta seção, procura-se mostrar o estudo de caso do CAISO [25].

2.3.1 Geradores eólicos como participantes no mercado convencional

Há vários obstáculos sérios para que os recursos de geração eólica tornem-se fornecedores competitivos no mercado de energia. Tal fato deve-se ao custo de produção relativamente alto, ao desfavorecimento quando a geração eólica máxima não coincide com a demanda máxima de energia, ao preço da energia limpa no mercado de energia (em termos da sua sazonalidade e variações diárias) e as dificuldades associadas com o despacho de energia

destes recursos altamente intermitentes.

Não há nenhuma limitação formal que proíba os recursos de geração eólica em participar do mercado de energia existente na Califórnia como geradores convencionais. Mas com a estrutura de mercado existente, isto resultaria em algumas desvantagens e problemas significativos para os geradores eólicos, coordenadores do despacho e para o operador independente do sistema.

A idéia é considerar os geradores participantes do mercado CAISO apenas como uma única unidade geradora. Um gerador eólico submeteria um despacho de energia hora a hora em mercados dia-dia ou hora-hora. As variações deste despacho seriam baseadas no preço de energia do mercado CAISO, a cada dez minutos. Como os geradores eólicos não são capazes de controlar sua saída, a fim de encontrar um despacho de energia firme, a possibilidade de variações significativas é alta, o que acarreta em ajustes constantes na liquidação do mercado. A opção de tratar estes geradores como participantes convencionais torna-se pouco atrativa devido ao risco de preços no mercado *spot* e da elevação dos custos para as variações no despacho.

Neste trabalho, será apresentada a proposta desenvolvida pelo CAISO de um novo modelo capaz de gerar vantagens para a contratação da energia baseada na geração eólica.

2.3.2 Programa de participação de geradores intermitentes

O programa desenvolvido pela CAISO permite que os geradores de energia intermitente (isto é, geradores eólicos e outros geram por fontes preliminares de energia não-controladas) despachem sua energia no mercado sem que se incorra encargos horários ou diários quando a energia fornecida difere da originalmente programada. Um fator chave para a implementação da nova metodologia é reduzir o tempo entre a programação e o despacho de energia. Os coordenadores do despacho que representam os participantes dos recursos intermitentes deverão utilizar estas previsões no despacho de energia submetido a CAISO. Os geradores eólicos seriam isentos da liquidação em 10 minutos, como também, dos encargos e multa por variações entre a energia programada e realmente despachada. Uma das soluções seria utilizar uma previsão de energia hora-hora capaz de resultar na liquidez do mês com variações de energia em torno de zero.

2.3.3 Penalidade por variação não-programada

A criação desta penalidade tem por finalidade fazer com que os geradores despachem a energia conforme à programada. Cada unidade geradora tem sua faixa de tolerância aceitável para variações de despacho fora do programado, baseada no tipo de geração. Cada unidade recebe uma faixa de tolerância baseada no despacho programado. Para o adequado fechamento do balanço é necessário que cada gerador fique dentro da faixa. As penalidades são avaliadas conforme a energia fornecida, MWh, fora da faixa de tolerância a cada 10 minutos, de acordo com o período de liquidez do mercado.

Neste caso, se as gerações eólicas fossem submetidas a estas regras, as mesmas encontrariam grande dificuldade de competitividade no mercado de energia. O Programa de Participação de Recursos Intermitentes (PIRP) propõe uma disputa mais competitiva para o mercado CAISO.

2.3.4 Despacho de energia hora-hora e dia-dia

O coordenador do despacho é uma entidade autorizada para submeter ao CAISO uma programação de energia equilibrada em nome de um ou mais geradores e/ou cargas. A programação de energia consiste em contratos bilaterais da geração, da carga ou por mercado livre e de intercâmbio de energia. A programação equilibrada consiste em que as importações mais a geração tem que ser igual a carga mais a exportação de energia. As programações ocorrem até 3 horas antes ao despacho.

Se um determinado gerador não garantir que a energia fornecida seja coincidente à programada antes do período de submissão do pré-despacho, o mesmo ficará de fora do mercado para àquela hora.

2.3.5 Serviço de previsão

O serviço de previsão recebe da CAISO informações sobre os despachos a cada 10 minutos. O sistema de previsão compila as informações e calcula (considerando a velocidade do vento, direção, temperatura, etc...) submetendo novamente à CAISO um novo cenário de geração para cada gerador eólico. A previsão é feita horas e dias à frente. Previsões prolongadas também são executadas até meses à frente.

2.3.6 Comentários

Tendo em vista o mercado competitivo para comercialização de energia elétrica, a CAISO propõe um modelo para incorporação de geradores intermitentes. Baseado em serviços de previsão, o operador do sistema admite uma incerteza aceitável quanto ao despacho de energia realizado pelos recursos intermitentes.

Tal modelo de comercialização ...

No próximo Capítulo, será apresentada a justificativa e modelo desenvolvido de fluxo de potência nebuloso multi-linearizado baseado na decomposição de números nebulosos.

3 Fluxo de potência nebuloso multi-linearizado

3.1 Análise de fluxo de potência

Dentro do campo da engenharia de sistemas de potência, um dos problemas básicos a se resolver é o problema do fluxo de potência, isto é, a determinação do estado do sistema elétrico em regime permanente. Esse cálculo do estado corresponde à determinação das tensões, representadas em módulo e fase, em todos os barramentos do sistema, conseqüentemente podem ser obtidos os fluxos de potência ativa e reativa nas linhas de transmissão, assim como, também, as perdas do sistema. Este estudo consiste basicamente na determinação do estado da rede sob condições estáticas, isto é, a obtenção das tensões complexas de barra desconhecidas supondo-se que as variações temporais sejam suficientemente lentas (análise estática). Na maioria dos casos, emprega-se uma representação monofásica supondo-se que as redes do sistema de potência são geralmente balanceadas.

O estudo de fluxo de potência (ou fluxo de carga) é um dos cálculos computacionais realizados com maior freqüência no planejamento, operação e controle de sistemas de potência, devido a necessidade de se conhecer os limites e intervalos de variação possíveis dos parâmetros, equipamentos e dispositivos do sistema, com a finalidade de atender qualitativa e ininterruptamente os consumos ou cargas do sistema. A qualidade visa satisfazer restrições, como manter a tensão nos nós e a freqüência dentro de uma faixa pré-estabelecida. Assim sendo, o sistema deve ter a capacidade de atender à solicitação de energia por parte dos consumidores, com uma reserva suficiente.

Nas últimas décadas, o processo de análise de fluxo de potência tem sido uma das ferramentas mais utilizadas na engenharia de sistemas elétricos de potência. O problema de fluxo de potência é formulado através de um conjunto de equações não lineares que devem ser resolvidas simultaneamente para obter o real valor do estado do sistema. A prática mostra uma realidade diferente. Os modelos usualmente empregados

para análise de fluxo de carga baseiam-se em aproximações. Em particular, tem-se uma fonte importante de incertezas nas injeções de potência (gerações, cargas) devido a erros na previsão, coleta e medição de grandezas. Estes aspectos se tornam ainda mais relevantes devido às mudanças no setor elétrico, que envolvem a desregulamentação e privatização do mesmo, fazendo com que as incertezas nas cargas e gerações sejam mais evidentes do que no modelo tradicional vertical do sistema elétrico.

Usualmente são realizados extensos estudos de fluxo de potência com a finalidade de estimar os limites e intervalos em que o sistema pode operar adequadamente. Não obstante, o fluxo de potência determinístico nem sempre pode ser capaz de prever alguns casos extremos de operação do sistema e que necessariamente não correspondem aos casos de carga mínima e/ou máxima como previsto. A idéia de se formular o fluxo de potência nebuloso é justamente a determinação de todos os casos extremos que o fluxo de potência determinístico não consegue identificar. Mais ainda, ele constitui uma análise de sensibilidade generalizada, sendo uma ferramenta eficiente na operação e planejamento dos sistemas de potência.

3.2 Fluxo de potência nebuloso

As distribuições de possibilidades são obtidas a partir de um modelo incremental construído em torno do ponto de operação determinístico. A validade da linearização está fortemente ligada ao grau de não-linearidade do problema e também ao tamanho dos incrementos envolvidos. Distribuições de possibilidades largas para variações de potência ativa e reativa são vistas pelo modelo incremental como grandes perturbações. Logo, a validade e a qualidade da solução pode ser comprometida, especialmente em condições de operação com carga pesada.

A idéia básica do fluxo de potência nebuloso é apresentar uma análise do comportamento de um sistema elétrico, para o tratamento da informação de caráter impreciso e vago, utilizando conjuntos nebulosos [8]. Pretende-se, deste modo, incorporar nos estudos de fluxo de cargas informações expressas de forma qualitativa e que não possuem natureza determinística ou probabilística.

3.2.1 Cargas e gerações nebulosas

Num ambiente de fluxo de carga nebuloso é essencial que declarações lingüísticas tais como “a carga na barra 11 será aproximadamente 15MW” ou “o fluxo de potência na linha 9 deverá ser perto de 5MW”, possam ser retratadas como números nebulosos ou, de outro ponto de vista, que distribuições de possibilidades possam ser associadas às injeções de potência previstas para as barras do sistema.

A construção de diagramas de carga nebulosa é um assunto aberto à pesquisa, sendo que algumas técnicas propostas podem ser encontradas em [8] [9] [10] [11]. Neste trabalho, para algumas barras, cargas e/ou gerações poderão ser representadas por valores nebulosos, os quais serão adotados como funções de pertinência da forma trapezoidal.

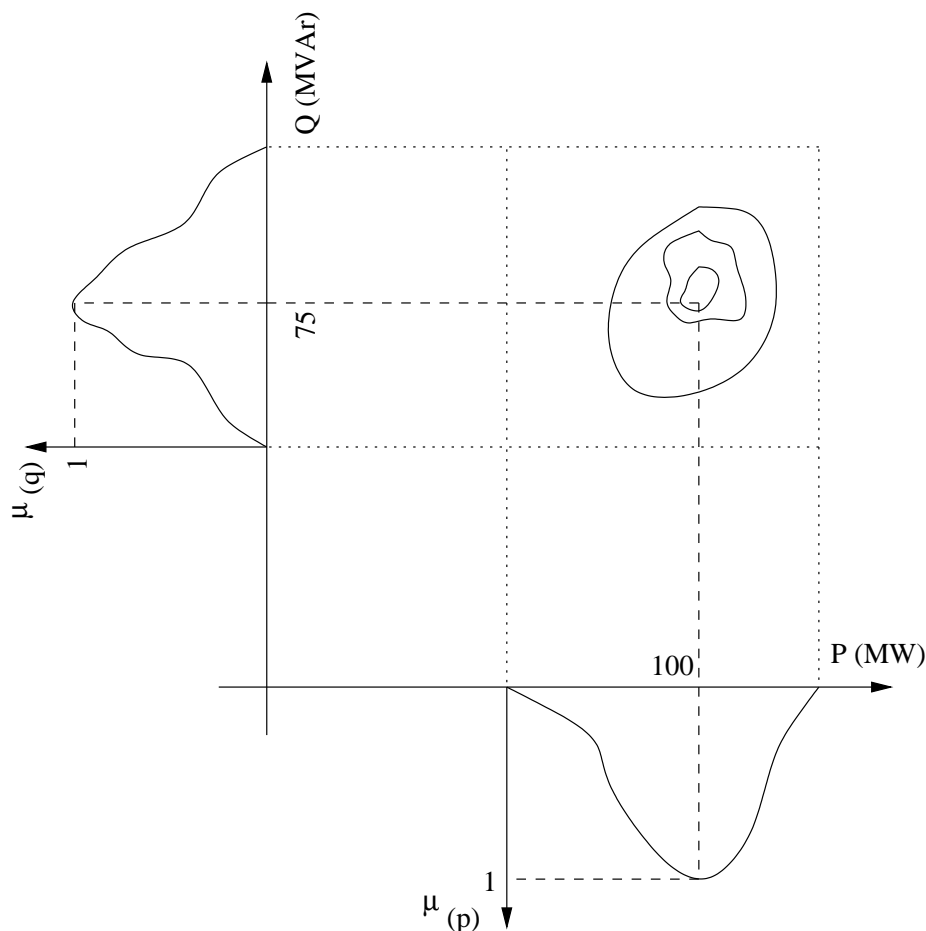


Figura 3.1: Descrição nebulosa de uma carga (P,Q)

Na Figura 3.1, é representada a descrição nebulosa da declaração “a potência ativa gerada é aproximadamente 100MW e a potência reativa gerada é 75MVar”. Vale observar que existem outras representações de cargas nebulosas, contudo deve-se ter em

mente que um valor de potência nebuloso sob a forma de (\tilde{P}, \tilde{Q}) , não pode ser convertido diretamente na forma $(\tilde{S}, \tilde{\theta})$.

3.2.2 Fluxo de carga nebuloso incremental

A primeira proposta para obtenção de uma descrição nebulosa dos ângulos e dos fluxos de potência ativa, foi baseada em um modelo incremental linear (CC) e sugerido por Miranda-Saraiva [8]. O procedimento para obtenção das distribuições de possibilidade eram dados da seguinte maneira:

- Executar um fluxo de carga linearizado determinístico utilizando como valores especificados os pontos médios das distribuições de possibilidades das diversas potências especificadas, obtendo-se valores determinísticos para os ângulos (θ_d) e os fluxos de potência ativa (P_{km_d}) .
- São avaliadas as distribuições de possibilidades $\Delta\tilde{P}_k$ das potências líquidas especificadas \tilde{P}_k com relação aos valores determinísticos P_d .
- As distribuições de possibilidades das variações do ângulo de barra $\Delta\tilde{\theta}_k$ e do fluxo de potência ativa $\Delta\tilde{P}_{km}$ podem ser avaliados considerando a matriz do modelo linear, $[B']$, e a matriz dos coeficientes de sensibilidade $[A]$. Portanto, o fluxo de potência nebuloso incremental CC é definido por:

$$\Delta\tilde{\theta}_k = [B']^{-1} \Delta\tilde{P}_k(V, \theta) \quad (3.1)$$

$$\Delta\tilde{P}_{km} = [A] \Delta\tilde{P}_k(V, \theta) \quad (3.2)$$

3.2.3 Fluxo de carga não-linear nebuloso

Um estudo de fluxo de carga em que pelo menos uma potência gerada ou de carga é representada por uma distribuição de possibilidades é denominado Fluxo de Carga Nebuloso. O objetivo do fluxo de carga nebuloso não linear é refletir as incertezas das injeções (cargas e/ou gerações) de potência ativa e reativa no estado do sistema, isto é, nos módulos das tensões e nos ângulos, assim como, nos fluxos ativos/reativos e perdas do sistema.

A estratégia proposta em [8] consiste em construir distribuições de possibilidades utilizando um modelo incremental em torno de um ponto de operação determinístico, previamente calculado através de fluxo de carga convencional. Uma vez que o ponto de operação é obtido, é possível avaliar as distribuições de possibilidades dos incrementos nebulosos das potências ativas (sobre barras PV e PQ) e reativas (sobre barras PQ), ambas referidas aos seus valores determinísticos.

$$\begin{bmatrix} \Delta\tilde{P} \\ \Delta\tilde{Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{P} \\ \tilde{Q} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} P_d \\ Q_d \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

As distribuições de possibilidades dos incrementos dos ângulos (barras PV e PQ) e tensões (barras PQ) são avaliados usando a matriz Jacobiana construída na última iteração do estudo determinístico, ou seja, em (V_d, θ_d) :

$$\begin{bmatrix} \Delta\tilde{\theta} \\ \Delta\tilde{V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H(V_d, \theta_d) & N(V_d, \theta_d) \\ M(V_d, \theta_d) & L(V_d, \theta_d) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta\tilde{P} \\ \Delta\tilde{Q} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

e:

$$\tilde{\theta} = \theta_d + \Delta\tilde{\theta} \quad (3.5)$$

$$\tilde{V} = V_d + \Delta\tilde{V} \quad (3.6)$$

onde $\Delta\tilde{\theta}$ e $\Delta\tilde{V}$ são as distribuições de possibilidades dos incrementos nos ângulos e nas tensões com relação aos valores determinísticos, enquanto que $\tilde{\theta}$ e \tilde{V} são, respectivamente, as distribuições de possibilidades dos ângulos e das tensões.

As distribuições de possibilidades dos incrementos dos fluxos nos ramos do sistema são estimadas utilizando uma aproximação linear a partir de $(\Delta\tilde{\theta}, \Delta\tilde{V})$.

$$\Delta\tilde{P}_{km} = \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta} \Delta\tilde{\theta} + \frac{\partial P_{km}}{\partial V} \Delta\tilde{V} \quad (3.7)$$

$$\Delta\tilde{Q}_{km} = \frac{\partial Q_{km}}{\partial \theta} \Delta\tilde{\theta} + \frac{\partial Q_{km}}{\partial V} \Delta\tilde{V} \quad (3.8)$$

As distribuições de possibilidades dos fluxos de potência ativa e reativa, respectivamente, são dados pelas expressões a seguir:

$$\tilde{P}_{km} = P_{km} + \Delta\tilde{P}_{km} \quad (3.9)$$

$$\tilde{Q}_{km} = Q_{km} + \Delta\tilde{Q}_{km} \quad (3.10)$$

As distribuições de possibilidades para a potência ativa na barra de folga, assim como, das potências reativas nas barras de folga e tensão controlada podem ser obtidas de maneira análoga, visto que também se podem considerar como funções não lineares de V e θ nos barramentos do sistema. Portanto, é possível obter através das distribuições de possibilidades sobrepondo os valores determinísticos e seus respectivos desvios.

$$\tilde{P}_g = P_{dg} + \Delta\tilde{P}_g \quad (3.11)$$

$$\tilde{Q}_g = Q_{dg} + \Delta\tilde{Q}_g \quad (3.12)$$

Para as perdas pode-se adotar uma técnica semelhante. Alguns estudos revelam que esta não é a metodologia mais satisfatória para linhas levemente carregadas ou naquelas em que podem ocorrer inversões do sentido de fluxo. Nestes casos, pode-se adotar a metodologia descrita em [8], tornando-se possível gerar uma matriz coeficiente de sensibilidade $[S]$ para as perdas ativas e reativas da forma:

$$[S] = [D].[J]^{-1} \quad (3.13)$$

A matriz $[D]$ é formada pelas derivadas parciais das perdas ativas e reativas para os valores V e θ nas barras da linha considerada. Temos ainda que $[J]^{-1}$ é a matriz inversa do Jacobiano construído a partir da última interação, sendo que $\sum_j |S_j|$ é a distribuição dos desvios referente as injeções de potência especificada para perdas ativas e reativas. Dessa forma, as perdas ativas podem ser obtidas aproximadamente por:

$$\tilde{P}_{km}^{LOSS} = P_{km}^{LOSSd} + \sum_j S_j \cdot \Delta Z_j \quad (3.14)$$

$$\Delta\tilde{P}_{km}^{LOSS} = \sum_j |S_j| \quad (3.15)$$

onde ΔZ_j representa os desvios das potências injetadas em relação ao valor determinístico para a barra j . Estes coeficientes dependem, apenas das características construtivas da rede e do ponto de operação inicial, isto é, do ponto em que será realizada a linearização.

3.3 Decomposição de incertezas

Decomposição de incertezas não é um tópico novo. De fato, nas últimas décadas vários autores têm abordado o assunto. São reconhecidos na maioria das literaturas dois grandes grupos: de um lado aqueles que utilizam métodos aleatórios, ou estocásticos, e um outro baseado no tratamento de incertezas [18].

Em [22], três classes de incertezas que são usualmente caracterizadas e tratadas em diferentes maneiras, são apresentadas: por parâmetros, por modelos e por completude. A incerteza por parâmetros é introduzida quando os valores de parâmetros para os modelos utilizados não são perfeitamente conhecidos. Incerteza por modelos nasce a partir do fato que algum modelo, mental ou matemático, inevitavelmente será uma simplificação da realidade caso seja necessário representá-lo. Incerteza por completude não é considerada como uma incerteza em si, mas como uma reflexão das limitações de espaço. Isto reflete uma contribuição não analisada na incerteza global, tornando difícil a estimativa de suas magnitudes [23].

A identificação de fontes de incertezas envolvidas no processo tem o papel importante no tratamento global da incerteza. Em outras palavras, diferentes classes de incerteza levam a diferentes aproximações em seu tratamento.

Em [21], o autor conclui que a separação de incertezas permite classificar separadamente a variabilidade de uma população de valores de interesse, externamente a referência específica para cada elemento e quantificar como esta classificação é influenciada pela falta de conhecimento. Estas duas parcelas de informações têm fornecido decisões diferentes.

Apesar da significativa bibliografia envolvendo a decomposição de incertezas, este conceito tem sido principalmente discutido para a classificação do tipo de incerteza e ligações (influências) entre elas. A intensidade destas ligações determina o grau de separação e de tratamento independente da incerteza. Neste trabalho é discutida a decomposição de incerteza para aplicação em aritmética nebulosa, no sentido de melhorar a avaliação da propagação da incerteza através de sistemas não-lineares. A base da aproximação proposta está citada na propriedade apresentada na seção 3.4.

3.4 Propriedade

Um conjunto nebuloso é um número nebuloso se o conjunto é convexo, normal, a função de pertinência monotônica é contínua em todo o intervalo e somente um valor satisfaz a condição de pertinência plena. As operações com números nebuloso são definidas segundo o princípio de extensão [24].

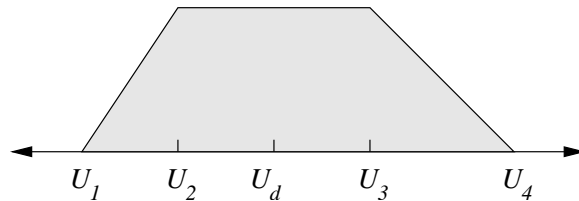


Figura 3.2: Número trapezoidal

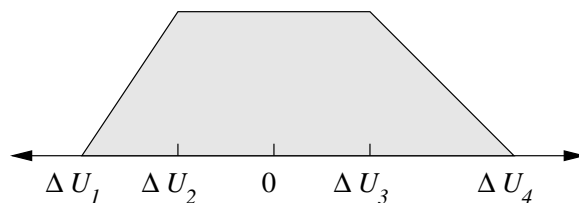


Figura 3.3: Número trapezoidal incremental

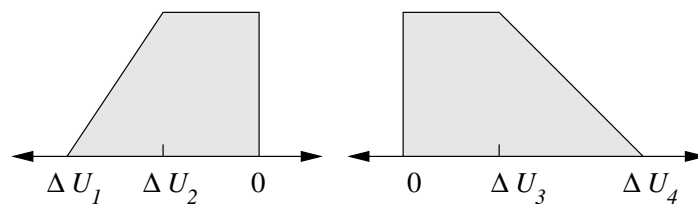


Figura 3.4: Decomposição do número nebuloso

Seja $\tilde{U} = (U_1, U_2, U_3, U_4)$ um número nebuloso trapezoidal, dado na Figura (3.2), associado a função de pertinência $\mu_{\tilde{U}}$. Considere U_d um valor determinístico tal que $U_2 \leq U_d \leq U_3$. Seja $\Delta\tilde{U} = \tilde{U} - U_d$, o número nebuloso original deslocado por U_d , com distribuição de possibilidades mostrada na Figura (3.3). Então, é possível decompor o número nebuloso incremental, $\Delta\tilde{U}$, em dois números nebulosos, $\Delta\tilde{U}^l$ e $\Delta\tilde{U}^r$, com incertezas complementares, à esquerda e à direita, respectivamente, como mostra a Figura (3.4), de modo que:

$$\Delta\tilde{U} = \Delta\tilde{U}^l + \Delta\tilde{U}^r \quad (3.16)$$

e

$$\Delta\tilde{U}^l = (\Delta U_1, \Delta U_2, 0, 0) \quad (3.17)$$

$$\Delta\tilde{U}^r = (0, 0, \Delta U_3, \Delta U_4) \quad (3.18)$$

Dessa Forma, são obtidos dois números com intervalos de incerteza complementar: um representando a incerteza do número ser menor que U_d e outro considerando a incerteza do número ser maior que U_d . Assim, decompondo a incerteza do número nebuloso, tem-se as seguintes vantagens:

- Lidar com números nebulosos incrementais com incerteza menor que a original. Em termos numéricos, permite trabalhar com variações ou incrementos menores que o original e;
- Re-linearizar o problema em qualquer ponto das duas novas distribuições.

Neste trabalho, o ponto de quebra é exatamente o ponto médio das distribuições de possibilidades.

A Figura 3.5 ilustra o procedimento. Dado um número nebuloso U , três soluções do sistema não linear são plotadas. Onde, N representa a solução não-linear, L corresponde a aproximação utilizando uma linearização clássica e M a versão multi-linearizada. Uma boa linearização possibilita obter uma melhor aproximação para a solução de problemas não-linear. A partir da Figura 3.5, pode-se observar que a solução multi-linearizada M está mais próxima da solução não-linear N com relação a solução por linearização clássica.

3.5 Descrição do método

O objetivo do fluxo de potência nebuloso não-linear é refletir as incertezas das injeções de potência ativa e reativa (cargas e/ou gerações) nas variáveis de estado do sistema, isto é,

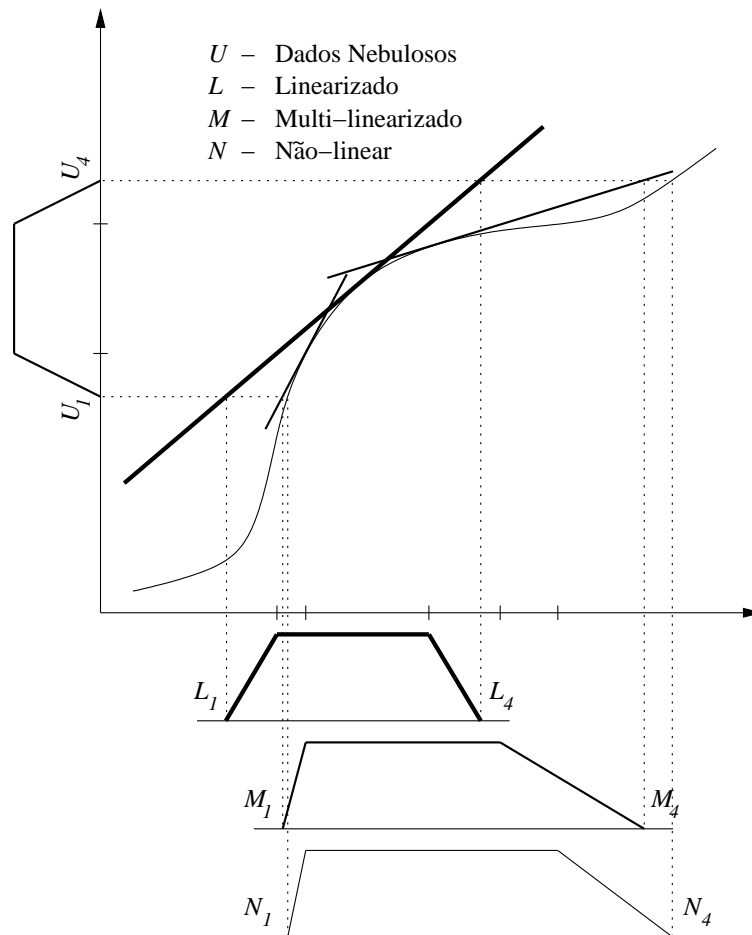


Figura 3.5: Exemplo ilustrativo da aproximação por multi-linearização

nos módulos das tensões e nos ângulos, assim como, nos fluxos ativos/reactivos e perdas do sistema.

A estratégia proposta em [8] consiste em construir distribuições de possibilidades utilizando o modelo incremental em torno de um ponto de operação determinístico, previamente calculado através de um fluxo de potência convencional. Uma vez que o ponto de operação é obtido, é possível avaliar as distribuições de possibilidades dos incrementos nebulosos das injeções de potências ativas (sobre as barras PV e PQ) e reativas (sobre as barras PQ), sendo ambas referidas aos seus valores determinísticos.

$$\begin{bmatrix} \Delta \tilde{P} \\ \Delta \tilde{Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{P} \\ \tilde{Q} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} P_d \\ Q_d \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

A linearização é concluída por meio da matriz Jacobiana calculada no ponto

de operação determinístico (V_d, θ_d):

$$\begin{bmatrix} \Delta\tilde{P} \\ \Delta\tilde{Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H(V_d, \theta_d) & N(V_d, \theta_d) \\ M(V_d, \theta_d) & L(V_d, \theta_d) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\tilde{\theta} \\ \Delta\tilde{V} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

e:

$$\Delta\tilde{\theta} = \tilde{\theta} - \theta_d \quad (3.21)$$

$$\Delta\tilde{V} = \tilde{V} - V_d \quad (3.22)$$

onde $\Delta\tilde{\theta}$ e $\Delta\tilde{V}$ são as distribuições de possibilidades dos incrementos nos ângulos e nas tensões com relação aos valores determinísticos, respectivamente. Enquanto, $\tilde{\theta}$ e \tilde{V} são as distribuições de possibilidades dos ângulos e das tensões, respectivamente.

As distribuições de possibilidades do fluxo de potência nos ramos do sistema são estimados utilizando uma aproximação linear a partir de $(\Delta\tilde{\theta}, \Delta\tilde{V})$.

3.6 Multi-linearização

Nesta seção, a propriedade supracitada para resolver o fluxo de potência por injeções nebulosas é utilizada. A idéia é utilizar, no modelo incremental (3.20), números com intervalos de incerteza menor que o número original.

Considere as injeções \tilde{P} e \tilde{Q} com distribuição trapezoidal de potência ativa e reativa, respectivamente, em uma dada barra. Considere também os incrementos nebulosos $\Delta\tilde{P}$ e $\Delta\tilde{Q}$, relativos aos respectivos pontos centros P_d e Q_d (ponto de operação determinístico). De acordo com a seção anterior, pode-se escrever:

$$\Delta\tilde{P} = \Delta\tilde{P}^l + \Delta\tilde{P}^r \quad (3.23)$$

$$\Delta\tilde{Q} = \Delta\tilde{Q}^l + \Delta\tilde{Q}^r \quad (3.24)$$

onde $\Delta\tilde{P}^l$ e $\Delta\tilde{P}^r$ são as distribuições parciais e complementares, à esquerda e à direita, de $\Delta\tilde{P}$. O caso reativo pode ser obtido do mesmo modo.

Em virtude da similaridade entre os processos de linearização à “esquerda e à direita” e tendo em vista a diminuição das equações a serem explicitadas, opta-se por

mostrar somente o caso à esquerda.

Assim, para $\Delta\tilde{P}^l$, um novo ponto de linearização P_c^l pode ser escolhido, preferencialmente um que corresponda ao ponto médio. Para o ponto determinístico (P_c^l, Q_c^l) e considerando sua correspondência com os valores não incrementais, um cálculo de fluxo de potência é executado, obtendo-se (θ_c^l, V_c^l) .

As distribuições incrementais à esquerda dos ângulos e das tensões são obtidas como segue:

$$\begin{bmatrix} \Delta\tilde{\theta}^l \\ \Delta\tilde{V}^l \end{bmatrix} = J_{(\theta_c^l, V_c^l)}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta\tilde{P}^l \\ \Delta\tilde{Q}^l \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Para o lado à direita procede-se de maneira similar. Após isso, as distribuições finais das variáveis nebulosas do problema são obtidas como segue:

$$\tilde{V} = V_d + \Delta\tilde{V}^l + \Delta\tilde{V}^r \quad (3.26)$$

$$\tilde{\theta} = \theta_d + \Delta\tilde{\theta}^l + \Delta\tilde{\theta}^r \quad (3.27)$$

3.6.1 Distribuição dos fluxos de potência ativa e reativa

As distribuições de possibilidades para as variações de fluxo de potências ativa e reativa podem ser calculadas utilizando as expressões a seguir:

$$\Delta\tilde{P}_{ij}^l = S_{\theta}^{P_{ij}} \Delta\tilde{\theta}^l + S_V^{P_{ij}} \Delta\tilde{V}^l \quad (3.28)$$

$$\Delta\tilde{Q}_{ij}^l = S_{\theta}^{Q_{ij}} \Delta\tilde{\theta}^l + S_V^{Q_{ij}} \Delta\tilde{V}^l \quad (3.29)$$

onde $S_{\theta}^{P_{ij}}$, $S_V^{P_{ij}}$, $S_{\theta}^{Q_{ij}}$ e $S_V^{Q_{ij}}$, são os vetores fila compostos pelas derivadas parciais dos fluxos de potência ativa e reativa, com relação às variáveis de estado V e θ . Portanto,

$$S_{\theta}^{P_{ij}} = \left[\frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_i} \middle| \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_j} \right] \quad (3.30)$$

$$S_V^{P_{ij}} = \left[\frac{\partial P_{ij}}{\partial V_i} \middle| \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_j} \right] \quad (3.31)$$

$$S_{\theta}^{Q_{ij}} = \left[\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_i} \middle| \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_j} \right] \quad (3.32)$$

$$S_V^{Q_{ij}} = \left[\frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_i} \middle| \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_j} \right] \quad (3.33)$$

As derivadas de P_{ij} e Q_{ij} são avaliadas no ponto (θ_c^l, V_c^l) . As expressões (3.28 e 3.29) são usadas para o lado direito também e o número nebuloso não incremental final é determinado de forma análoga às expressões (3.26-3.27), ou seja:

$$\tilde{P}_{ij} = P_{ij_d} + \Delta \tilde{P}_{ij}^l + \Delta \tilde{P}_{ij}^r \quad (3.34)$$

$$\tilde{Q}_{ij} = Q_{ij_d} + \Delta \tilde{Q}_{ij}^l + \Delta \tilde{Q}_{ij}^r \quad (3.35)$$

3.6.2 Injeções de potência nas barras de folga e PV

A distribuição de potência ativa resultante para a barra de folga e as distribuições de potência reativa nas barras PV e de folga são estimadas a partir dos fluxos nos ramos ligados a essas barras:

$$\Delta \tilde{P}_k^l = \sum_{(i,j) \in \Omega_k} \Delta \tilde{P}_{ij}^l \quad (3.36)$$

$$\Delta \tilde{Q}_k^l = \sum_{(i,j) \in \Omega_k} \Delta \tilde{Q}_{ij}^l \quad (3.37)$$

As expressões (3.36 e 3.37) são usadas para o lado direito também e o número nebuloso não incremental final é determinado de forma análoga às expressões (3.26-3.27), ou seja:

$$\tilde{P}_i = P_{i_d} + \Delta \tilde{P}_i^l + \Delta \tilde{P}_i^r \quad (3.38)$$

$$\tilde{Q}_i = Q_{i_d} + \Delta \tilde{Q}_i^l + \Delta \tilde{Q}_i^r \quad (3.39)$$

3.6.3 Distribuição de perdas

As distribuições de perdas são estimadas por ramos, utilizando expressões similares às (3.28-3.36). Ou seja:

$$\Delta\tilde{P}r_{ij}^l = S_{\theta}^{Pr_{ij}} \Delta\tilde{\theta}^l + S_V^{Pr_{ij}} \Delta\tilde{V}^l \quad (3.40)$$

onde $S_{\theta}^{Pr_{ij}}$ e $S_V^{Pr_{ij}}$ são os vetores de sensibilidade de perdas nos ramos ij com relação aos ângulos e tensões, respectivamente, avaliados no ponto de linearização (θ_c^l, V_c^l) . Finalmente, a distribuição de perdas totais do sistema é dada por:

$$\Delta\tilde{P}r^l = \sum_{(i,j) \in \Omega_{NL}} \Delta\tilde{P}r_{ij}^l \quad (3.41)$$

A distribuição de possibilidades final é dada pela soma das componentes $\Delta\tilde{P}r^l$ e $\Delta\tilde{P}r^r$, considerando os valores de referência incremental, análoga à (3.26-3.27).

3.6.4 Comentários

Neste capítulo, o modelo de fluxo de carga multi-linearizado baseado na decomposição de números nebulosos foi apresentado, cuja principal finalidade do método é melhorar a qualidade da solução de problemas não-lineares.

A análise da performance do método é avaliado na Seção 5.1 (Página 51).

No próximo Capítulo será apresentada a estrutura de composição de um sistema nebuloso baseado em regras e no sistema de inferência nebulosa.

4 Sistema nebuloso

Neste capítulo apresenta-se a estrutura típica de composição de um sistema nebuloso baseado em regras e no sistema de inferência nebulosa capaz de absorver uma informação determinística na entrada, convertê-la em nebulosa e refleti-la, no bloco de saída, em informações nebulosas que, dependendo do sistema e do tipo informação a ser extraída, podem ser, ainda, convertidas em informações precisas.

Será adotado neste capítulo um sistema nebuloso, Figura 4.1, baseado em quatro blocos: defuzzificador, regras, inferência e fuzzificador [28].

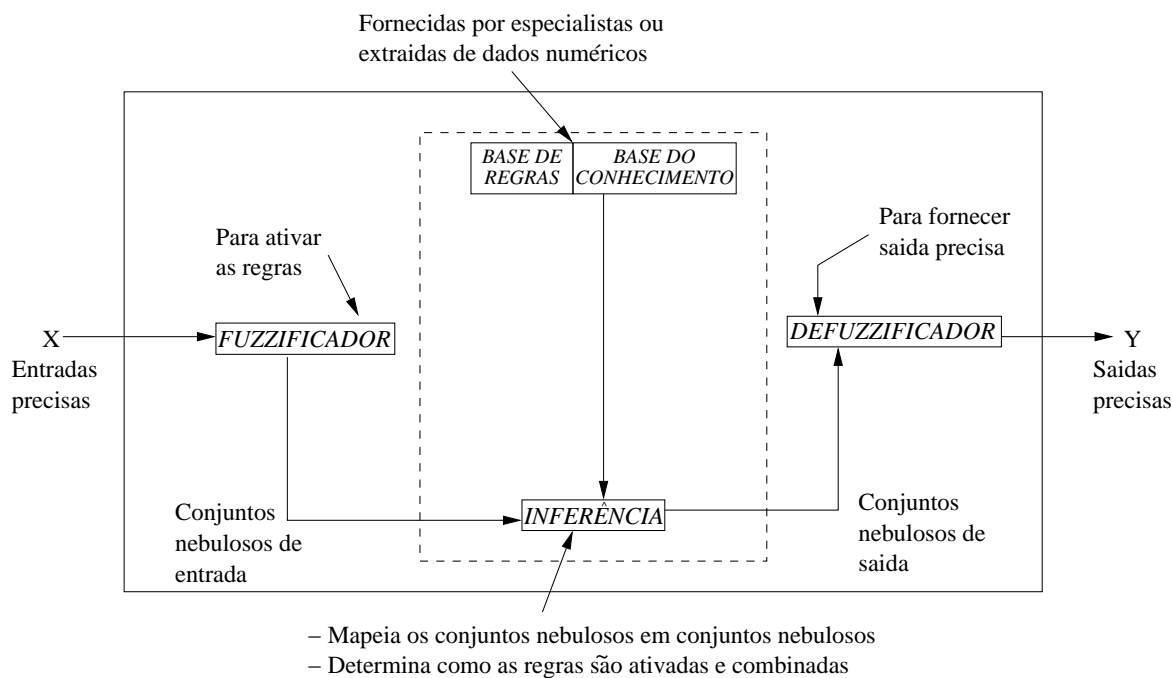


Figura 4.1: Sistema nebuloso

A idéia básica é apresentar um sistema nebuloso flexível, capaz de receber informações sob a forma da linguagem natural [10], como também, a partir de informações mais simples. Por exemplo, quando a informação de um especialista está baseada somente no intervalo de incerteza.

4.1 Fuzzificador

O fuzzificador, em sua definição, é uma estrutura que utiliza as funções de pertinência pré-estabelecidas, mapeando cada variável de entrada do sistema em graus de pertinência correspondente a algum conjunto nebuloso que representa a variável relacionada.

Neste trabalho, adotam-se dois tipos de fuzzificadores: um baseado em interface lingüística utilizando modificadores e o outro apenas em intervalos de incerteza.

4.1.1 Fuzzificador baseado em interface lingüística

É de grande importância a utilização de uma interface lingüística que permita tornar mais eficiente e clara a comunicação usuário-máquina, traduzindo informações expressas sob a forma de proposições da linguagem natural para distribuições de possibilidades trapezoidais, a partir de entradas precisas.

A incerteza característica de um problema é definida pela especificação, pelo usuário, de um valor que se admita possuir possibilidade 1.0 (P_d) e de margens de variação ou erro, à direita e à esquerda, podendo ainda serem diferentes entre si. Assim, obtém-se um número nebuloso triangular correspondente a uma incerteza base, Figura 4.2. A partir de um valor central, P_d , cujo intervalo de incerteza à esquerda e à direita será determinada pelas variações ou pelo erro da grandeza.

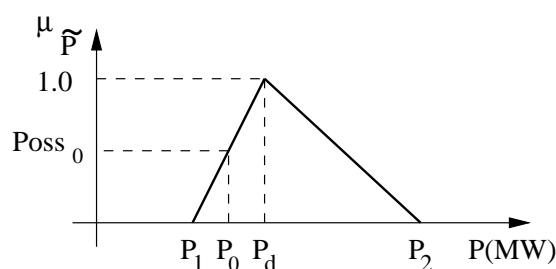


Figura 4.2: Incerteza base representada por um número nebuloso triangular

A incerteza base é relacionada a um modificador lingüístico para que seja representada por um conjunto nebuloso trapezoidal. Tal conjunto nebuloso será obtido através da composição dos conjuntos associados à incerteza base e ao modificador lingüístico selecionado, conforme descreve a expressão 4.1 [10]:

$$\tilde{C}(P_d) = \tilde{M} \circ \tilde{B}(P_d) \quad (4.1)$$

onde \tilde{C} é o conjunto nebuloso associado à incerteza composta, \tilde{B} é o conjunto nebuloso associado à incerteza base, \tilde{M} é o conjunto nebuloso associado ao modificador lingüístico e \circ representa a operação de composição entre dois conjuntos nebulosos.

Considere que o grau de possibilidade de um valor P_0 , Figura 4.2, será o valor de pertinência de $Poss_0$ ao conjunto nebuloso associado ao modificador “bastante”, Figura 4.3, isto é o valor $Poss_0^1$. Procedendo desta maneira, obtém-se o número nebuloso, Figura 4.4 associado à incerteza composta.

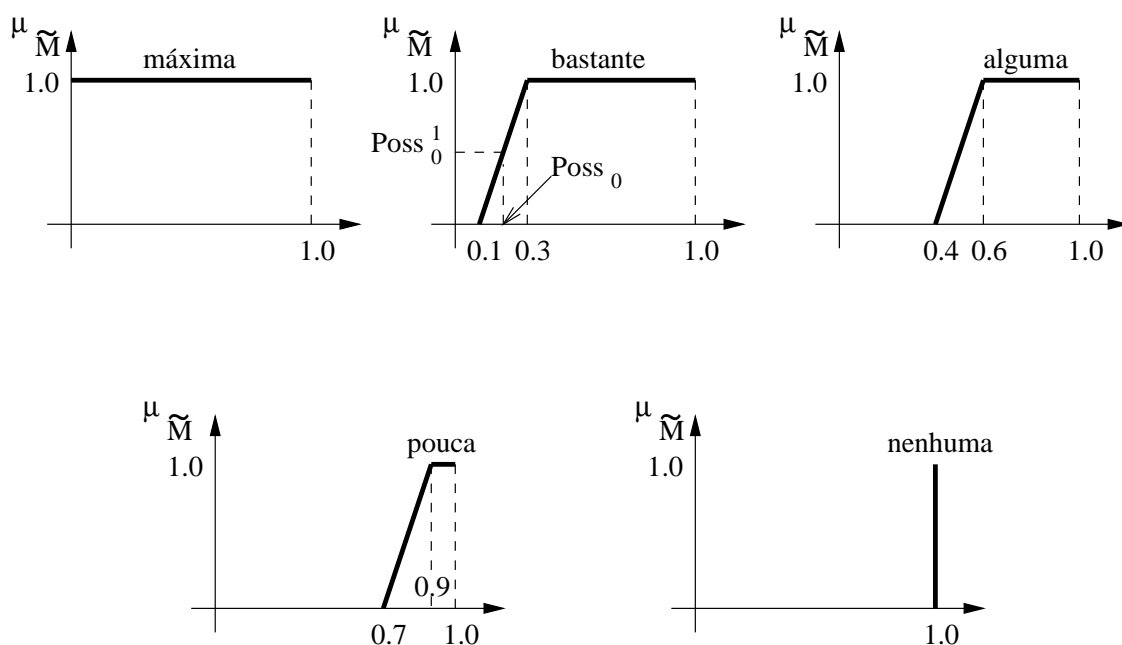


Figura 4.3: Conjuntos nebulosos associados aos modificadores lingüísticos

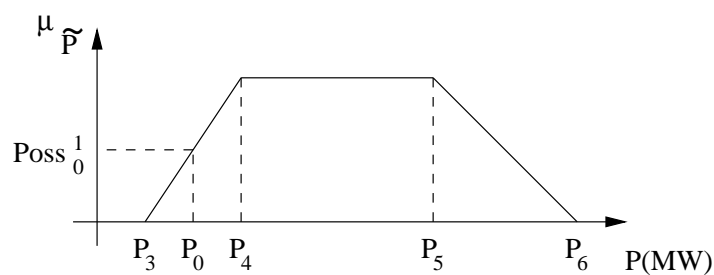


Figura 4.4: Número nebuloso trapezoidal representando a incerteza composta

4.1.2 Fuzzificador baseado em intervalos de incerteza

Neste trabalho, utiliza-se este tipo de fuzzificador com o objetivo de tornar o mais simples e amigável possível o emprego de modelos nebulosos para a solução de problemas que envolvam incertezas.

Dessa forma, considere X_d com uma variável determinística, Figura 4.5. Ao incorporar a esta variável, informações vagas do tipo: em torno de, próximo a, acima de, etc; a mesma adquire características nebulosas. Da mesma forma, quando atribui-se a esta variável um intervalo possível de ocorrência, a mesma converte-se em variável nebulosa, uma vez que foi incorporada um intervalo de incerteza.

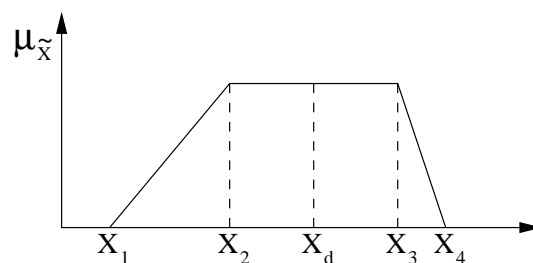


Figura 4.5: Conjunto nebuloso de entrada

4.2 Regras

As regras nebulosas são estruturas bastante utilizadas em várias abordagens da teoria nebulosa e podem ser entendidas de diversas maneiras. Conceitualmente, as regras nebulosas descrevem situações específicas que podem ser submetidas à análise de especialistas, e cuja inferência nos conduz a algum resultado desejado. A inferência baseada em regras nebulosas pode também ser compreendida como uma função que mapeia um conjunto de entradas do sistema para um conjunto de saídas (como em uma interpolação).

A regra nebulosa é uma unidade capaz de capturar algum conhecimento específico, e um conjunto de regras é capaz de descrever um sistema em suas várias possibilidades.

Uma vez construído o conjunto de regras nebulosas necessita-se de uma máquina de inferência para extrair dela a resposta final. Existem vários métodos de

inferência possíveis e a escolha, por um deles, depende do sistema que está sendo analisado.

As regras são processadas em paralelo, ou seja, todas as regras (circunstâncias) são consideradas ao mesmo tempo, e ao final obtém-se uma resposta que pode ser tanto um valor numérico clássico quanto um conjunto nebuloso ou uma função. Às vezes é necessário que a saída do sistema seja um número, pois o sistema precisa ser re-alimentado.

Nestes casos se a saída do sistema for um conjunto nebuloso, então se faz necessário um processo de defuzzificação para se obter um número apropriado.

4.3 Inferência

Os sistemas nebulosos são, em geral, o resultado de uma generalização dos sistemas clássicos, ou seja, nessa abordagem os conceitos nebulosos (vagos) são incorporados à esses sistemas. Os sistemas nebulosos estimam funções com descrição parcial do comportamento do sistema, onde especialistas podem prover o conhecimento heurístico, ou esse conhecimento pode ser inferido a partir de dados de entrada-saída do sistema. Desta forma, pode-se dizer que os sistemas nebulosos são sistemas baseados em regras que utilizam variáveis lingüísticas nebulosas (conjuntos nebulosos) para executar um processo de tomada de decisão.

4.4 Defuzzificador

O defuzzificador, em sua definição, é uma estrutura que transforma os resultados nebulosos da inferência em valores de saída. Calcula a saída com base na inferência obtida através de um módulo da unidade de decisão ou de uma solução do problema nebuloso para obter uma saída não-nebulosa. Nesta etapa, os conjuntos nebulosos resultantes são convertidos em valores de saída do sistema.

Neste trabalho, adotam-se dois tipos de defuzzificadores: um baseado em interface lingüística utilizando modificadores e o outro apenas em valores precisos.

4.4.1 Defuzzificador baseado em interface lingüística

De maneira similar ao exposto na seção 4.1.1, há uma necessidade de se interpretar as informações colocadas na fase de apresentação e análise dos resultados. Pois, neste momento, o usuário poderá confrontar-se com uma grande quantidade de valores numéricos, os quais se tornam importante interpretar, de alguma forma, essa informação. Assim, nesta seção, é descrita uma interface lingüística que permitirá a tradução de conhecimentos expressos sob a forma de distribuição de possibilidades em proposições de linguagem natural.

Para caracterizar esta interface considere que os modificadores lingüísticos referidos em 4.1.1 são formados, de forma unívoca, por um par ordenado de valores lidos no eixo das abscissas de suas representações gráficas das distribuições de possibilidades, que correspondem aos pontos extremos do segmento que efetua a transição entre os valores possuindo possibilidades 0.0 e 1.0. Obtém-se, assim, os pares ordenados:

modificador	“máxima”	= (0.0, 0.0)
modificador	“bastante”	= (0.1, 0.3)
modificador	“alguma”	= (0.4, 0.6)
modificador	“pouca”	= (0.7, 0.9)
modificador	“nenhuma”	= (1.0, 1.0)

Pretende-se, então, atribuir uma classificação incerta ao número trapezoidal, expressão 4.2, é possível obter a distribuição de possibilidade da respectiva incerteza base, expressão 4.3, representada por um número nebuloso triangular. Essa distribuição é obtida considerando-se que:

- os cortes de nível 0.0 das distribuições de possibilidades da incerteza base e do número nebuloso a classificar sejam iguais;
- o valor central do número nebuloso triangular associado à incerteza base corresponde ao valor médio do corte de nível 1.0 do número nebuloso trapezoidal a classificar.

$$\tilde{P} = (P_1; P_2; P_3; P_4) \quad (4.2)$$

$$\tilde{P}_d = (P_1; (P_2 + P_3)/2; P_4) \quad (4.3)$$

O valor das abscissas dos pontos extremos do segmento ligando os pontos possuindo graus de pertinência 0.0 e 1.0 do novo modificador lingüístico podem ser agora obtidos. Este processo está representado na Figura 4.6. Neste caso, ao novo modificador lingüístico está associado o par ordenado $(Poss_1, Poss_2)$. Pode-se afirmar que este novo modificador foi obtido de forma que a sua composição com a incerteza base, expressão 4.3, permita obter 4.2. Torna-se, agora, possível obter os graus de compatibilidade deste par ordenado aos pares associados aos cinco modificadores iniciais, conforme a expressão:

$$\mu_{\tilde{M}_i, \tilde{M}_k} = \left[\sum_{j=1}^5 (d_{ik}/d_{jk})^2 \right]^{-1} \quad (4.4)$$

onde $\mu_{\tilde{M}_i, \tilde{M}_k}$ é o grau de pertinência do modificador \tilde{M}_k ao conjunto nebuloso associado ao modificador \tilde{M}_i ; d_{jk} é a distância entre os pares ordenados associados aos modificadores \tilde{M}_j e \tilde{M}_k .

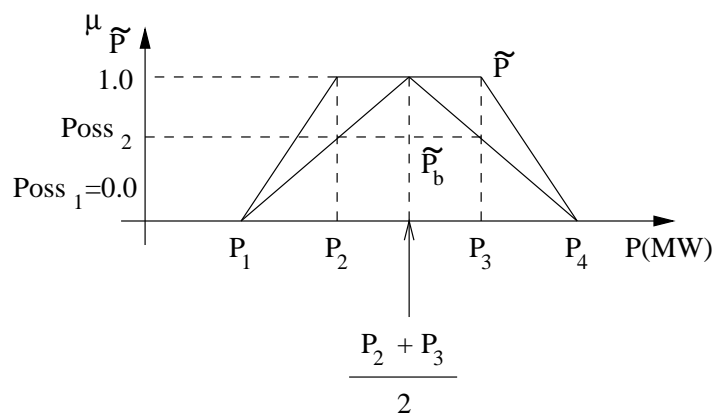


Figura 4.6: Conjuntos nebulosos representando o novo modificador lingüístico

Deste modo, é possível obter uma classificação nebulosa do modificador \tilde{M}_k , de tal forma que a distribuição de possibilidade (4.2) poderá ser traduzida por uma afirmação do gênero:

- “o número nebuloso trapezoidal tem como valor central $(P_2 + P_3)/2$ com pouca a alguma incerteza no intervalo de P_1 a P_4 .”

4.4.2 Defuzzificador baseado em valores precisos

Seja \tilde{Y} o conjunto nebuloso de saída representado pela função de pertinência $\mu_{\tilde{Y}}$, Figura 4.7.

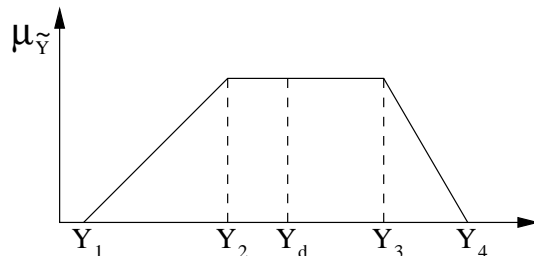


Figura 4.7: Conjunto nebuloso de saída

A expressão (4.5) [17] extrai do conjunto nebuloso \tilde{Y} um valor determinístico. Esta saída precisa define o valor mais esperado dentre àqueles da distribuição de possibilidade passíveis de ocorrer.

$$y_0 = \frac{\int_Y y \cdot \mu_Y(y) \cdot dy}{\int_Y \mu_Y(y) \cdot dy} \quad (4.5)$$

A expressão (4.6) extrai do conjunto nebuloso \tilde{Y} um outro valor determinístico. Esta saída precisa é uma medida da quantidade de incerteza contida na função de pertinência $\mu_{\tilde{Y}}$.

$$E_Y = \int_Y \mu_Y(y) \cdot dy \quad (4.6)$$

4.5 Comentários

Neste capítulo foi apresentado um sistema de inferência típico. O fuzzificador tem o papel de extrair de um dado preciso informações capazes de tornar a variável de entrada em uma variável nebulosa. Este tratamento pode ser dado através de uma interface lingüística ou simplesmente pela incorporação de uma informação de caráter vago fornecida por um especialista. Neste trabalho, o fuzzificador gera um número nebuloso que será mapeado, refletindo como resultado da inferência outro número nebuloso que dependendo

da complexidade do problema poderá ser defuzzificado. Dessa forma, têm-se na saída do sistema nebuloso novamente informações de caráter preciso.

O desempenho de um sistema de inferência nebuloso depende de uma escolha da base de regras adequada e do número e forma dos conjuntos atribuídos a cada variável.

No próximo capítulo serão apresentadas as performances entre os modelos utilizando multi-linearização e a baseada em linearização clássica.

5 Estudo de casos: performance do método e incorporação de geradores eólicos na rede convencional

A seção 5.1 avalia os resultados numéricos obtidos nos testes quanto à decomposição de números nebulosos para solução de sistemas nebulosos não-linear. A performance do modelo multi-linearizado baseado na decomposição de números nebulosos é analisada.

As seções 5.2.2 e 5.3 apresentam o estudo de casos para avaliar a propagação da incerteza e o impacto desta no despacho integrado do sistema, respectivamente. São inseridos dois geradores idênticos em uma rede convencional real para análise.

Nos sistemas de distribuição de energia quaisquer perturbações ou variações de cargas e/ou gerações são sentidas pelas subestações, ou seja, a barra de folga realiza o balanço de energia.

Do ponto de vista da concessionária, variações nas gerações eólicas vão impactar no fornecimento de potência reativa da subestação. Dessa forma, a subestação deve ter a capacidade de atender a solicitação de energia por parte das cargas com uma reserva suficiente. Tais variações são também refletidas na análise de curto-circuito, o que pode afetar diretamente as proteções do sistema de distribuição.

Do ponto de vista do despacho integrado, tais variações de energia devem ser percebidas durante o pré-despacho destas unidades através de sistemas de previsão, a fim de subsidiar os estudos de decisão e viabilidade para o atendimento contínuo ou até o emprego de reserva girante para suprir a demanda contratada.

5.1 Performance do modelo multi-linearizado

Para ilustrar o procedimento, é considerado um pequeno sistema sem perdas de 2 barras como exemplo didático, Figura 5.1. Entretanto, para validar a aproximação em um caso mais realista, testes utilizando um sistema 30 barras também são apresentados. O

programa computacional foi desenvolvido em FORTRAN 90.

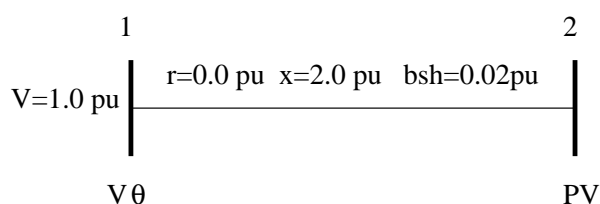


Figura 5.1: Sistema 2 barras

5.1.1 Sistema 2 barras

A barra 1 é definida como a barra de folga (sendo $V = 1,0$ pu e $\theta = 0,0$ rad), enquanto a barra 2 é a barra de carga com tensão controlada igual a 1,0 pu. A incerteza é associada com a potência ativa da carga e é modelada através de número nebuloso trapezoidal.

Os parâmetros da rede (reatância, resistência e susceptância) são assumidos como $r = 0,0$ pu, $x = 2,0$ pu e $b_{sh} = 0,02$ pu, respectivamente. O fluxo de carga nebuloso foi estimado a partir de uma iteração utilizando o Método de Newton. O caso determinístico foi calculado com uma tolerância de 10^{-6} MW/MVAr.

É observada a propagação da incerteza sobre o ângulo da barra 2 e conseqüentemente, sobre o fluxo de potência. Note que a tensão e o ângulo da barra 1 são, por definição, determinísticos.

As Tabelas 5.1 e 5.2 mostram as distribuição de possibilidades para os ângulos da barra 2, utilizando a linearização clássica e a aproximação multi-linearizada, respectivamente. Três níveis de carga são considerados: 1) Carga Normal, 2) Carga Pesada, 3) Carga Extremamente Pesada. As respectivas distribuições são:

Tabela 5.1: Distribuição de possibilidades dos ângulos ($^{\circ}$) - Linearização clássica

Carga	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	ξ %
1	-23,354	-17,436	-11,519	-5,601	2,25
2	-43,658	-36,797	-29,937	-23,077	2,11
3	-74,526	-63,650	-52,773	-41,897	16,14

Tabela 5.2: Distribuição de possibilidades dos ângulos ($^{\circ}$) - Multi-linearização

carga	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	ξ %
1	-23,565	-17,507	-11,568	-5,748	0,31
2	-44,377	-37,037	-30,111	-23,600	0,11
3	-80,830	-65,751	-53,678	-44,612	9,04

$$\tilde{P}_1 = (0, 05; 0, 10; 0, 15; 0, 20), \tilde{P}_2 = (0, 20; 0, 25; 0, 30; 0, 35), \tilde{P}_3 = (0, 35; 0, 40; 0, 45; 0, 50).$$

Este último caso descreve um cenário atípico severo.

A Tabela 5.3 mostra a avaliação determinística não-linear para os pontos extremos da distribuição de possibilidades da carga.

Tabela 5.3: Avaliação determinística não-linear para os pontos extremos ($^{\circ}$)

carga	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4
1	-23.574	-17.457	-11.535	-5.730
2	-44.420	-36.866	-29.997	-23.574
3	-88.865	-64.142	-53.120	-44.420

A coluna erro ξ %, Tabelas 5.1 e 5.2, mostra o maior dos erros para os pontos extremos θ_1 e θ_4 , como segue:

$$\xi = \text{Max}\{\Delta\theta_1, \Delta\theta_4\}$$

onde $\Delta\theta_1$ e $\Delta\theta_4$ são os erros relacionados com os valores determinísticos não-lineares. Pode-se observar que o modelo multi-linearizado mostra soluções muito mais próximas à solução não-linear, em outras palavras, a multi-linearização melhora a qualidade da solução da aproximação baseada em linearização clássica.

O caso 3 ilustra um cenário extremo, onde o alto grau de não-linearidade do problema torna muito difícil a obtenção de uma resposta satisfatória para o modelo baseado na linearização clássica. Contudo, no aspecto mais realista e prático, casos 1 e 2, uma boa performance é obtida, sendo que a aproximação baseada em multi-linearização

apresenta erros ainda menores.

5.1.2 Sistema 30 barras

O sistema 30 barras corresponde a rede padrão de testes do IEEE, composta por 30 nós e 41 ramos [19]. Uma incerteza de +/- 10% dos valores nominais são assumidos para todas as cargas do sistema.

A Tabelas 5.4 e 5.5 mostram as distribuições de possibilidades para os ângulos ($^{\circ}$) e tensões (pu) de seis nós eleitos aleatoriamente considerando a aproximação clássica.

Tabela 5.4: Distribuição de possibilidades dos ângulos sistema IEEE30 ($^{\circ}$) - Linearização clássica

Barra	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	ξ %
2	-4,036	-3,893	-3,183	-3,041	7,34
7	-10,274	-9,969	-8,443	-8,137	5,51
13	-11,133	-10,788	-9,066	-8,721	6,02
19	-13,965	-13,577	-11,634	-11,245	4,94
25	-13,563	-13,184	-11,285	-10,905	4,87
28	-9,147	-8,869	-7,474	-7,196	5,75

Tabela 5.5: Distribuição de possibilidades das tensões sistema IEEE30 (pu) - Linearização clássica

Barra	V_1	V_2	V_3	V_4	ξ %
4	1,0147	1,0152	1,0177	1,0181	0,08
14	1,0461	1,0470	1,0517	1,0526	0,14
20	1,0279	1,0293	1,0363	1,0376	0,21
24	1,0188	1,0204	1,0284	1,0300	0,26
26	0,9953	0,9971	1,0064	1,0083	0,29
30	0,9870	0,9889	0,9984	1,0003	0,30

As Tabelas 5.6 e 5.7 mostram as distribuições de possibilidades para os ângulos

(°) e tensões (pu) de seis nós eleitos aleatoriamente considerando a aproximação multi-linearizada.

Tabela 5.6: Distribuição de possibilidades dos ângulos sistema IEEE30 (°) - Multi-linearização

Barra	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	ξ %
2	-4,254	-3,896	-3,185	-2,833	0,00
7	-10,741	-9,973	-8,447	-7,688	0,31
13	-11,661	-10,794	-9,072	-8,216	0,12
19	-14,563	-13,584	-11,641	-10,676	0,37
25	-14,147	-13,191	-11,292	-10,349	0,48
28	-9,574	-8,873	-7,479	-6,786	0,28

Tabela 5.7: Distribuição de possibilidades das tensões sistema IEEE30 (pu) - Multi-linearização

Barra	V_1	V_2	V_3	V_4	ξ %
4	1,0139	1,0151	1,0176	1,0188	0,00
14	1,0446	1,0469	1,0516	1,0539	0,00
20	1,0258	1,0293	1,0362	1,0396	0,00
24	1,0162	1,0203	1,0283	1,0323	0,00
26	0,9923	0,9971	1,0063	1,0109	0,01
30	0,9839	0,9888	0,9983	1,0030	0,01

Nas Tabelas 5.6 e 5.7, a aproximação multi-linearizada mantém também uma melhor performance sobre o modelo linearizado, apesar de ambas respostas obterem erros pequenos.

A Tabela 5.8 mostra a avaliação determinística não-linear dos pontos extremos da distribuição de possibilidades da carga.

Similarmente ao caso anterior, a aproximação multi-linearizada mostra soluções mais próximas a solução não-linear, principalmente para as distribuições dos ângulos.

Tabela 5.8: Avaliação determinística não-linear para os pontos extremos

Barra	Ângulos		Barra	Tensões	
	θ_1	θ_4		V_1	V_4
2	-4,254	-2,833	4	1,0139	1,0188
7	-10,718	-7,712	14	1,0446	1,0539
13	-11,651	-8,226	20	1,0258	1,0396
19	-14,523	-10,716	24	1,0162	1,0323
25	-14,097	-10,399	26	0,9924	1,0109
28	-9,555	-6,805	30	0,9840	1,0029

5.1.3 Observações

- a) É importante enfatizar que a aproximação baseada em multi-linearização melhora a qualidade da solução em relação a linearização clássica, a qual é muito útil em uma larga dimensão de aplicação prática. Alguns cuidados adicionais são necessário no tratamento de funções descontínuas e não-monotônicas, nas quais o processo de multi-linearização necessita ser restringido em uma região, que dependerá do foco do problema em particular [20].
- b) Quando utilizado o modelo de multi-linearização, é possível solicitar através de critérios uma condição para verificar a necessidade de decomposição do número. A necessidade de decomposição do número para obter uma multi-linearização ótima dependerá principalmente da natureza do problema. O erro pode ser usado como parâmetro, porém para problemas com regiões severas com diferentes graus de não-linearidade, um critério deverá ser calculado (por exemplo, erro médio, etc). Em estudos com sistemas reais, a bi-linearização apresenta-se, em média, adequada.
- c) Como a linearização deve ser desenvolvida? É necessário lembrar que a finalidade do modelo de multi-linearização é decompor o problema em vários problemas com incertezas menores que as originais. Em termos numéricos, permite trabalhar com variações ou incrementos menores, melhorando a qualidade da solução do problema linearizado [21]. Em geral, como não se conhece o comportamento não-linear do problema, considerar o ponto centro da função de pertinência como ponto de

separação, é uma estratégia razoável. Para re-linearização, a mesma estratégia é sugerida. Em casos onde regiões com alta não-linearidade são identificadas, é recomendável a alocação do ponto de divisão para esta região.

5.2 Propagação da incerteza

Para validação dos testes, um sistema real 16 barras foi utilizado. Um sistema com características radiais é utilizado para ilustrar o efeito da propagação da incerteza.

5.2.1 Sistema 16 barras

Utiliza-se neste estudo, um sistema real de 16 barras de uma rede de distribuição fornecida pela Companhia Energética do Maranhão - CEMAR. Adaptou-se à rede a instalação de dois geradores eólicos idênticos, barras 7 e 16, com capacidades nominais de 5 MW, com o ponto centro da distribuição definido em 4 MW. Similarmente, assumiu-se uma potência reativa nominal de 2 MVar com ponto centro da distribuição de 1.6 MVar. As injeções de potência foram modeladas através de números trapezoidais nebulosos. A tensão na barra de folga é considerada de 1.1 pu. O fluxo de carga nebuloso é resolvido pelo Método de Newton. O caso determinístico é calculado com uma tolerância de 10^{-6} MW/MVar.

As Figuras 5.2.1 e 5.2.1 mostram as distribuições de possibilidades trapezoidais para as gerações eólicas de potência ativa e reativa, respectivamente.

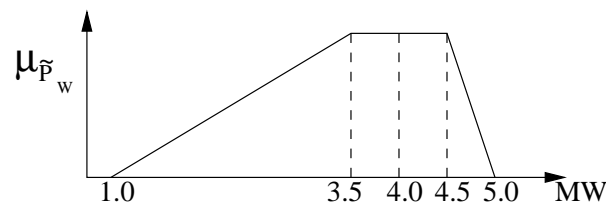


Figura 5.2: Geração eólica ativa nebulosa - \tilde{P}_W

A Tabela 5.9 mostra os dados do sistema de 16 barras original. Para os testes foram considerados dois geradores eólicos idênticos dispostos nas barras 7 e 16. Foram utilizados os fatores 1.0, 1.5 e 2.0 para simular os perfis de carregamento leve, normal e pesado, respectivamente.

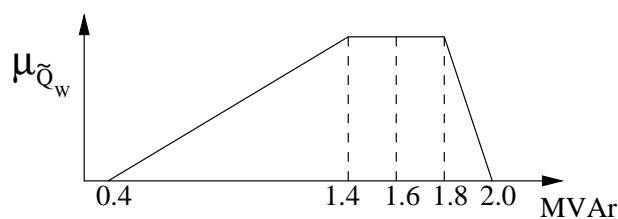


Figura 5.3: Geração eólica reativa nebulosa - \tilde{Q}_w

A Figura 5.2.1 ilustra a propagação da incerteza dentro da rede, desde os geradores eólicos até a subestação e as barras colaterais.

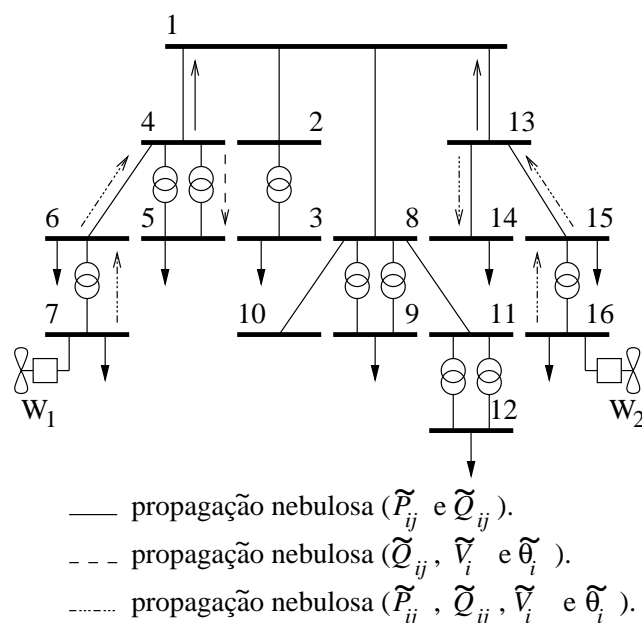


Figura 5.4: Sistema 16 barras modificado

Pode-se observar que dois dos alimentadores ligados diretamente a subestação retêm um comportamento determinístico, seja na tensão, nos ângulos ou nos fluxos. Isto se deve ao fato que a subestação é responsável pelo balanço do sistema. Dessa forma, as variações originadas pela geração eólica são compensadas pela subestação, barra de folga, até o seu limite da capacidade de fornecimento de energia. Assim, os impactos causados pelas variações na geração, barras 7 e 16, não são, por exemplo, refletidas nas barras 2 e 8.

As barras colaterais 5 e 14 são afetadas pelas variações originadas nas barras da geração eólica. Apesar, destas duas barras serem exclusivamente de carga, a incerteza é projetada pelas tensões e ângulos, uma vez que, estas duas variáveis têm que garantir

um fluxo de potência suficiente para compensar as perdas nos ramos.

A Tabela 5.10 mostra os resultados determinísticos para os fluxos de potência ativa e reativa. Os três perfis de carregamento foram analisados.

Observa-se, também, que na barra 5 colateral a incerteza é projetada somente sobre o ângulo, tensão e fluxo de potência reativo. Isto se deve ao elemento, entre as barras 4 e 5, ser um transformador que neste trabalho é modelado com perdas em 0%. Dessa forma, o fluxo ativo 4-5 não recebe a componente nebulosa gerada pela perda do sistema.

A Tabela 5.11 ilustra a distribuição de possibilidades para os fluxos de potência ativa para o resto do sistema. Os três perfis de carregamento foram analisados.

A Tabela 5.12 ilustra a distribuição de possibilidades para os fluxos de potência reativa para o resto do sistema. Os três perfis de carregamento foram analisados.

A Figura 5.2.1 mostra a propagação da incerteza quando o nível de carregamento do sistema é aumentado. Note que o grau de incerteza da distribuição de possibilidades aumenta não-linearmente com o fator de carga. Entretanto, a fonte de incerteza (geradores eólicos) permanece com o mesmo grau de incerteza.

Pode-se observar que a incerteza associada aos geradores eólicos está projetada sobre a barra 1, barra da subestação geradora. Como conseqüência, o operador de sistema deve ter disponível uma geração que deva ser, com possibilidade elevada, entre 79,258 e 82,964 MW, porém nunca excederá 93,328 MW e nem será menor que 77,624 MW, para um fator da carga $FC = 2,0$. Apesar da geração na barra 1 assumir um valor nebuloso, a tensão e o ângulo permanecem fixos.

Perceba na Tabela 5.13 que a diferença entre as medidas de incerteza associadas a potência na barra de folga e às perdas do sistema é igual a soma das incerteza associadas a cada gerador eólico, ou seja, igual a 5,0. Isto ocorre devido ao aumento da carga, atribuindo-se às perdas de uma maneira não-linear. Em outras palavras, o fenômeno não-linear das perdas é *projetado* no espaço das incertezas.

Utilizando a expressão (4.6) tem-se que a incerteza associada a cada gerador eólico é 2,5. Note que na Tabela 5.15 a incerteza associada ao gerador eólico W_2 é 5,211, superando mais que o dobro da incerteza originalmente injetada pela fonte.

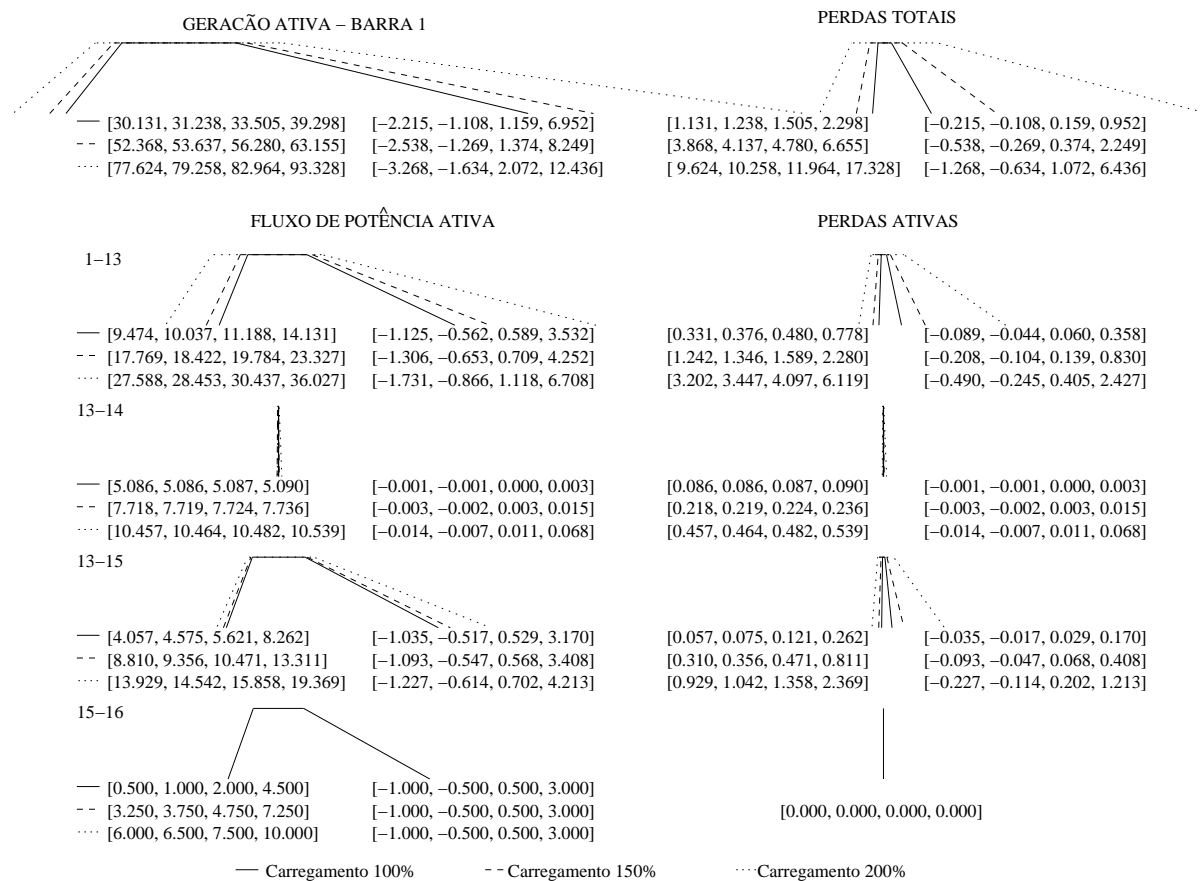


Figura 5.5: Propagação da incerteza

5.2.2 Propagação da incerteza via linguagem natural

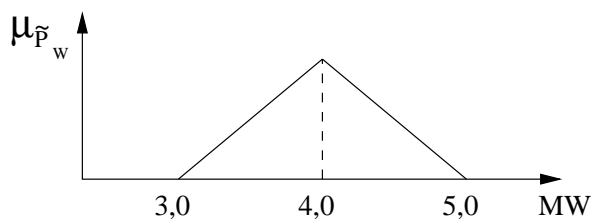


Figura 5.6: Geração eólica ativa nebulosa - \tilde{P}_W

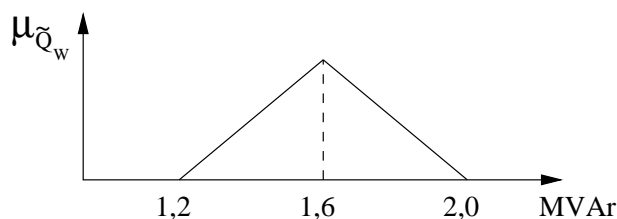


Figura 5.7: Geração eólica reativa nebulosa - \tilde{Q}_W

Considere agora que ambos geradores eólicas, W_1 e W_2 , possuem em suas gerações um comportamento nebuloso segundo uma incerteza base representada por um número nebuloso triangular, conforme as Figura 5.2.2 e 5.2.2:

Aplicando-se os modificadores lingüísticos de “máxima” e “alguma” incerteza, Figura 4.3, aos geradores W_1 e W_2 , respectivamente, obtém-se na barra de folga uma distribuição de possibilidade para a geração de potência ativa, como mostra a Figura 5.2.2.

A Tabela 5.14 mostra a caracterização da incerteza das distribuições de possibilidades da geração de potência ativa na barra de folga, em termos dos cinco modificadores lingüísticos considerados neste estudo, de acordo com a metodologia exposta nas seções 4.1.1 e 4.4.1.

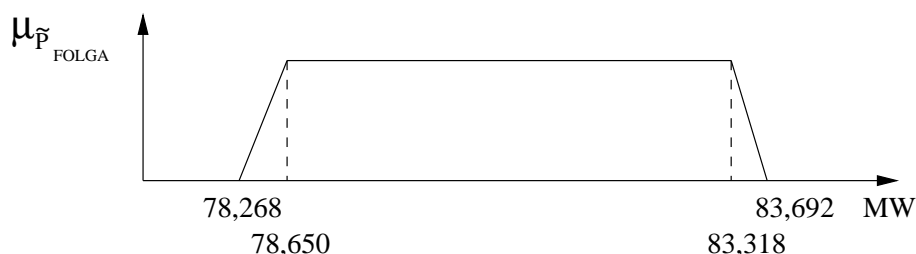


Figura 5.8: Geração ativa nebulosa na barra de folga - \tilde{P}_{FOLGA}

Assim, a geração de potência ativa na barra de folga pode ser descrita pela seguinte afirmação:

“A geração de potência ativa na barra de folga tem um valor central de 80,984 MW e bastante a máxima incerteza no intervalo 78,268 e 83,692 MW, para um carregamento de 200% ”.

Alterando-se o modificador lingüístico, associado ao gerador W_1 , de “máxima” para “nenhuma” incerteza, obtém-se na barra de folga uma distribuição de possibilidade para a geração de potência ativa, como mostra a Figura 5.2.2.

De maneira análoga, pode-se obter a seguinte afirmação:

“A geração de potência ativa na barra de folga tem um valor central de 80,914 MW e bastante incerteza no intervalo 79,834 e 82,015 MW, para um carregamento de 200% ”.

Estas informações poderão ser de grande utilidade como uma ferramenta de

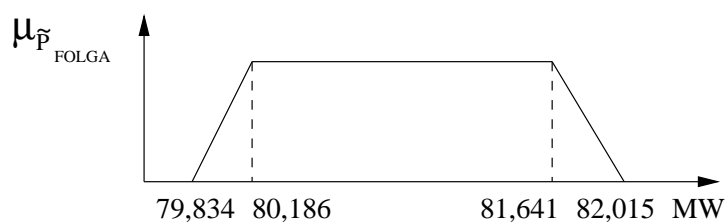


Figura 5.9: Geração ativa nebulosa na barra de folga - \tilde{P}_{FOLGA}

suporte a decisão. Neste caso, pode-se considerar que o operador lingüístico *máxima* seja o fator de restrição para que um determinado gerador não submeta energia no despacho integrado do sistema. Dessa forma, sempre que o operador lingüístico *máxima* for citado em uma afirmação, o risco de despacho para aquele período pode tornar a operação não-econômica elevado. Esta decisão é subjetiva e deverá ser baseada na experiência dos agentes envolvidos no problema.

5.3 Impacto no despacho do sistema

A natureza intermitente dos recursos de geradores eólicos é uma realidade que não pode ser eliminada completamente. Ferramentas especiais de previsão são requeridas para criar condições para a competitividade dos geradores eólicos no mercado de energia. A geração eólica é um recurso altamente intermitente que não oferece competitividade em mercados tradicionais devido aos problemas de despacho.

Um gerador eólico pode submeter-se a um despacho de hora em hora para sua geração no dia-dia ou em mercados de hora-hora. Desde que os geradores eólicos não podem controlar sua saída para encontrar um despacho de potência firme, as variações da incerteza é significativamente elevada.

Na informação nebulosa, os dados meteorológicos locais atuais, os dados do operador da geração eólica e os dados da exatidão da previsão podiam ser incluídos. Esta opção pode ser suficientemente atrativa para os produtores independentes eólicos, uma vez que, o risco de preços em mercado “spot” e o custo das variações do despacho podem ser avaliados.

Esta avaliação é relevante para a operação do sistema, como definir continuamente limites razoáveis da reserva girante, ou ainda, como determinar os custos

incorridos pelo não cumprimento dos contratos. Além do mais, é necessário ao produtor independente eólico, para a determinação de estudos de decisão e de viabilidade para o fornecimento contínuo ou o emprego da reserva girante - ou mercado “spot” - para suprir a demanda contratada. Conseqüentemente, a avaliação nebulosa pode ajuda os operadores do sistema e os produtores independentes a definir quando o risco do não cumprimento dos contratos faz ser não atrativa a participação de geradores eólicos no mercado da eletricidade.

Uma medida do grau de incerteza é dado pela expressão [17]:

$$E_{\mathbf{u}} = \int_U \mu_{\mathbf{u}}(\mathbf{u}) \cdot d\mathbf{u} \quad (5.1)$$

E uma expressão para o valor mais esperado da geração é dada por:

$$u_0 = \frac{\int_U \mathbf{u} \cdot \mu_{\mathbf{u}}(\mathbf{u}) \cdot d\mathbf{u}}{\int_U \mu_{\mathbf{u}}(\mathbf{u}) \cdot d\mathbf{u}} \quad (5.2)$$

A Tabela 5.15 mostra as medidas de incerteza calculadas a partir das expressões acima. Com o aumento do nível de carregamento do sistema, a potência “firme” e o grau de incerteza também aumentam, porém de forma não-linear. Se o despachante do sistema e/ou os geradores independentes assumem que um nível razoável de aceitação é 3.0, então, ambos geradores são recomendados a manter-se fora do mercado neste estágio, para os níveis de carga 1.5 e 2.0. Claramente, esta decisão é subjetiva e baseada na experiência de pessoas envolvidas neste problema. Se os agentes independentes decidirem assumir este risco, a possibilidade de operação não-econômica é elevada.

Conforme análise feita na seção 5.2.1, verifica-se que a incerteza se propaga até a barra de folga do sistema, sendo adicionada a incerteza original do gerador à componente das perdas que é projetada no espaço das incertezas. Fato agravado quando do aumento do carregamento do sistema.

Assim, o operador do sistema deverá compensar não somente a incerteza projetada pela geração eólica, mas também a incerteza adicionada pelas perdas do sistema. O déficit eventual será comprado no mercado a curto prazo de energia.

O estudo, visto pelo lado gerador, proporciona ao mesmo realizar a análise de risco quanto à programação do despacho. Exemplificando através do mercado CAISO:

suponha que o nível de incerteza igual a 1 seja o aceitável para que o gerador se encontre dentro da faixa de tolerância determinada para ele, sendo assim, capaz de participar da programação de despacho. Para a distribuição de possibilidades $\tilde{P} = (1, 0; 3, 5; 4, 5; 5, 0)$, a incerteza associada a geração é 2,5. Assim, neste caso é um risco submeter a programação do despacho.

Entretanto, para a distribuição de possibilidade $\tilde{P} = (3, 0; 4, 0; 5, 0)$, vai depender do modificador lingüístico utilizado, ou seja, será necessário que o especialista forneça informações quanto ao grau de incerteza envolvida na previsão para avaliação do risco. Esta análise resultará na participação ou não da unidade no despacho integrado do sistema.

Tabela 5.9: Sistema 16 barras - CEMAR

Ramo						Carga (MVA)	
$i - j$	$R(\Omega)$	$X(\Omega)$	$Y_{ij}^{sh}(\Omega^{-1})$	tap	$b_j^{sh}(\Omega^{-1})$	$P_j \times LF^*$	$Q_j \times LF^*$
1-2	39,54	40,91	0,532	0,	0,	0,	0,
2-3	0,	230,40	0,	0,975	0,	4,0	2,0
1-4	41,53	60,95	0,870	0,	0,	0,	0,
4-5	0,	151,60	0,	0,925	0,	2,5	1,0
4-5	0,	149,80	0,	0,925	0,	0,	0,
4-6	36,73	54,52	0,825	0,	0,	4,0	1,5
6-7	0,	144,80	0,	0,	0,	4,5	2,2
1-8	31,06	45,58	0,651	0,	0,	0,	0,
8-9	0,	144,80	0,	0,975	1,2	5,5	2,0
8-9	0,	144,80	0,	0,975	0,	0,	0,
8-11	48,85	41,07	0,525	0,	0,	0,	0,
8-10	97,49	100,86	1,311	0,	0,	0,	0,
11-12	0,	257,60	0,	0,925	0,	4,5	2,2
11-12	0,	254,40	0,	0,925	0,	0,	0,
1-13	40,89	42,30	0,550	0,	0,	0,	0,
13-14	33,50	43,63	0,047	0,	0,	5,0	1,5
13-15	33,76	44,93	0,454	0,	0,	3,5	1,5
15-16	0,	144,80	0,	0,925	0,	5,5	2,2

* FC é o Fator de Carregamento: 1.0 = leve, 1.5 = normal, 2.0 = pesado

Tabela 5.10: Fluxo de potência determinístico (MW/MVAr) obtido nos testes.

FC	1,0		1,5		2,0	
Ramo	P_{ij}	Q_{ij}	P_{ij}	Q_{ij}	P_{ij}	Q_{ij}
1-2	4,070	1,853	6,174	3,566	8,348	5,741
2-3	4,000	2,412	6,000	4,009	8,000	5,995
4-5	1,243	-	1,864	-	2,485	-
4-5	1,257	-	1,886	-	2,515	-
1-8	10,401	0,904	16,032	4,778	22,187	9,912
8-9	2,750	0,382	4,125	1,075	5,500	1,869
8-9	2,750	0,382	4,125	1,075	5,500	1,869
8-11	4,614	1,985	7,049	3,709	9,647	5,943
8-10	0,005	-1,495	0,005	-1,408	0,004	-1,307
11-12	2,236	1,227	3,354	1,984	4,472	2,924
11-12	2,264	1,242	3,396	2,009	4,528	2,960

Tabela 5.11: Distribuições de possibilidades para os fluxos de potência ativa

Fator de carga	Ramo	\tilde{P}_{ij}				
	$i - j$	P_{ij}^1	P_{ij}^2	P_{ij}^3	P_{ij}^4	P_{ij}^d
1,0	1-4	6,186	6,731	7,847	10,697	7,276
	4-5	-	-	-	-	1,243
	4-5	-	-	-	-	1,257
	4-6	3,546	4,062	5,106	7,744	4,579
	6-7	-0,500	0,000	1,000	3,500	0,500
	1-13	9,474	10,037	11,188	14,131	10,599
	13-14	5,086	5,086	5,087	5,090	5,087
	13-15	4,057	4,575	5,621	8,262	5,092
	15-16	0,500	1,000	2,000	4,500	1,500
1,5	1-4	12,392	13,008	14,290	17,621	13,624
	4-5	-	-	-	-	1,864
	4-5	-	-	-	-	1,886
	4-6	8,021	8,565	9,676	12,506	9,109
	6-7	1,750	2,250	3,250	5,750	2,750
	1-13	17,769	18,422	19,784	23,327	19,075
	13-14	7,718	7,719	7,724	7,736	7,721
	13-15	8,810	9,356	10,471	13,311	9,903
	15-16	3,250	3,750	4,750	7,250	4,250
2,0	1-4	19,501	20,269	21,992	26,765	21,037
	4-5	-	-	-	-	2,485
	4-5	-	-	-	-	2,515
	4-6	12,814	13,418	14,704	18,114	14,022
	6-7	4,000	4,500	5,500	8,000	5,000
	1-13	27,588	28,453	30,437	36,027	29,319
	13-14	10,457	10,464	10,482	10,539	10,471
	13-15	13,929	14,542	15,858	19,369	15,156
	15-16	6,000	6,500	7,500	10,000	7,000

Tabela 5.12: Distribuições de possibilidades para os fluxos de potência reativa

Fator de carga	Ramo	\tilde{Q}_{ij}				Q_{ij}^d
	$i - j$	Q_{ij}^1	Q_{ij}^2	Q_{ij}^3	Q_{ij}^4	
1,0	1-4	1,071	1,352	1,982	3,727	1,633
	4-5	0,518	0,518	0,518	0,519	0,518
	4-5	0,524	0,524	0,524	0,525	0,524
	4-6	0,847	1,082	1,599	3,013	1,317
	6-7	0,203	0,405	0,839	2,000	0,607
	1-13	2,550	2,840	3,484	5,254	3,130
	13-14	1,560	1,561	1,564	1,569	1,562
	13-15	1,285	1,526	2,057	3,502	1,768
	15-16	0,203	0,417	0,878	2,112	0,631
1,5	1-4	4,718	5,147	6,128	8,894	5,575
	4-5	0,796	0,797	0,798	0,801	0,797
	4-5	0,806	0,806	0,807	0,810	0,807
	4-6	3,188	3,506	4,224	6,226	3,824
	6-7	1,364	1,606	2,137	3,588	1,847
	1-13	6,854	7,302	8,319	11,164	7,750
	13-14	2,487	2,490	2,497	2,515	2,493
	13-15	3,694	4,028	4,783	6,882	4,363
	15-16	1,471	1,739	2,330	3,947	2,006
2,0	1-4	10,016	10,753	12,643	18,409	11,490
	4-5	1,096	1,097	1,101	1,113	1,099
	4-5	1,109	1,110	1,114	1,127	1,112
	4-6	6,272	6,759	7,987	11,687	7,247
	6-7	2,775	3,094	3,863	6,114	3,413
	1-13	13,318	14,125	16,219	22,650	14,932
	13-14	3,555	3,565	3,590	3,668	3,574
	13-15	7,029	7,570	8,959	13,197	8,111
	15-16	3,166	3,548	4,499	7,343	3,931

Tabela 5.13: Potência versus perdas

Fator de carga	Barra de folga		Perdas totais	
	Medida de incerteza	Potência firme (MW)	Medida de incerteza	Perda firme (MW)
1,0	5,717	32,762	0,717	1,429
1,5	6,715	55,336	1,715	4,592
2,0	9,705	81,839	4,705	11,505

Tabela 5.14: Caracterização da incerteza da geração de potência ativa na barra de folga

W_1	W_2	$P_{FOLGA}^{\text{médio}}$	$\mu_{\text{máxima}}$	μ_{bastante}	μ_{alguma}	μ_{pouca}	μ_{nenhuma}
$\mu_{\text{máxima}}$	μ_{alguma}	80,984	64%	31%	3%	1%	1%
μ_{nenhuma}	μ_{alguma}	80,914	9%	86%	4%	1%	1%

Tabela 5.15: Incerteza versus carga

Fator de carga	Gerador eólico W_1		Gerador eólico W_2	
	Medida de incerteza	Potência firme (MW)	Medida de incerteza	Potência firme (MW)
1,0	2,814	7,981	2,904	11,327
1,5	3,256	14,465	3,460	19,972
2,0	4,494	22,338	5,211	30,870

6 Conclusões

Nesta dissertação de mestrado foi apresentado o estudo do impacto da inserção de geradores eólicos nas redes convencionais de energia elétrica através de uma abordagem nebulosa.

Como ferramenta base foi utilizado o fluxo de carga nebuloso multi-linearizado, também desenvolvidos pelos autores. A estratégia proposta permite que o erro introduzido pela linearização seja amenizado, em especial quando se trata de situações de sistema mal condicionados ou carga pesada.

O impacto da geração distribuída baseada em geração eólica no despacho de potência também foi avaliado. Os resultados mostram que a incerteza associada aos geradores eólicos é projetada nas barras do sistema, mas sem expandir incertezas nos ramos colaterais e nem nas tensões da barra da subestação. Mesmo que a geração eólica considerada seja muito menor do que a carga total exigida, as conclusões obtidas são inteiramente respeitáveis.

Foi analisado o impacto da componente não-linear das perdas como catalisador das incertezas projetadas na barra de folga. Foi verificado que tal fato é agravado quando o carregamento do sistema aumenta. Dessa forma, conclui-se que sistemas estressados tendem a ter um maior nível de incerteza agregada quando da participação de agentes imprecisos no sistema, sejam eles geradores ou cargas.

A incerteza da geração na barra da subestação dá uma idéia da quantidade de capacidade que o operador de sistema deve disponibilizar nesta barra, a fim de manter o balanço de carga. As medidas do grau da incerteza podem ajudar ao despachante do sistema e ao gerador independente a avaliar o risco de desempenho em uma operação não econômica devido o não cumprimento dos contratos. Neste sentido, será necessário evoluir para algoritmos mais complexos que promovam o despacho das centrais controladas, atendendo aos seus custos de geração e as restrições de operação e de segurança, em face de imprecisões ao nível das gerações intermitentes. Este será um importante objetivo a atingir, visto tornar mais integradas aos algoritmos já disponíveis.

Este trabalho apresentou uma proposta para a decomposição de números nebulosos incrementais com largas incertezas utilizados em soluções de sistemas nebulosos não-linear. O procedimento é baseado em uma propriedade relacionada com números nebulosos incrementais, a mesma é apresentada neste trabalho. Esta propriedade permite a formulação de um procedimento multi-linearizado para resolver equações não-lineares com coeficientes “crisp” e estimar a penetração da incerteza nas variáveis do sistema. Para validar o procedimento, o fluxo de potência nebuloso tem sido considerado. Testes mostram o realçamento da qualidade da solução obtida a partir da análise de fluxo de carga por introdução das melhorias no modelo de linearização.

Foi implementada apenas a decomposição em dois números nebulosos, porém é possível aumentar esta quantidade, segundo exijam as necessidades do caso. Portanto, dependendo do grau de não-linearidade do problema e do tamanho dos intervalos de incerteza pode ocorrer que a decomposição em somente dois números não seja suficiente para a resolução do problema.

Trabalhos futuros:

- Desenvolver uma interface lingüística visual;
- Incorporar conceitos de gerenciamento baseado no risco;
- Intensificar as pesquisas que relacionem o fenômeno das perdas elétricas e o incremento da incerteza na rede elétrica.

A Apêndice

A.1 Conjuntos nebulosos

Neste apêndice, apresenta-se uma revisão da teoria de conjuntos nebulosos. Inicialmente são apresentadas as noções básicas e definições de conjuntos nebulosos. Em seguida, são apresentados tipos e as principais operações com conjuntos nebulosos. Finalmente, é apresentada uma revisão sobre os números nebulosos e as operações entre eles. São enfatizados os conjuntos e números nebulosos definidos por funções de pertinência triangulares e trapezoidais.

A.1.1 Função de pertinência

Os conjuntos nebulosos podem ser definidos por funções de pertinência, cuja propriedade principal é assumir arbitrariamente um valor real entre 0 e 1. Desta forma, pode-se concluir que as funções de pertinência são uma extensão das funções características.

A.1.2 Tipos de funções de pertinência

Em princípio, algumas funções do tipo $\mu_A : X \rightarrow [0, 1]$ descrevem funções de pertinência associadas a um conjunto nebuloso A que depende não somente do conceito a ser representado, mas também do contexto em que este é utilizado. Os gráficos das funções podem ter muitas formas diferentes ou somente propriedades específicas. O fato de uma forma particular ser adequada somente será determinado pela sua aplicação no contexto. Em certos casos, porém, o significado semântico capturado por um conjunto nebuloso não é muito sensível às variações da forma, podendo ser representados por funções mais simples e convenientes. Alguns exemplos práticos de conjuntos nebulosos são representados explicitamente por uma família de funções definidas por parâmetros. As funções de pertinência mais comuns são mostradas a seguir:

1 - Função triangular

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{m-a}, & \text{se } x \in [a, m] \\ \frac{b-x}{b-m}, & \text{se } x \in [m, b] \\ 0, & \text{se } x \geq b \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

onde m é o valor médio, a e b são os extremos à esquerda e à direita, respectivamente. Esta função pode ser obtida através de parâmetros, neste caso tem-se:

$$A(x; a, m, b) = \max \{ \min[(x - a)/(m - a), (b - x)/(b - m)], 0 \} \quad (\text{A.2})$$

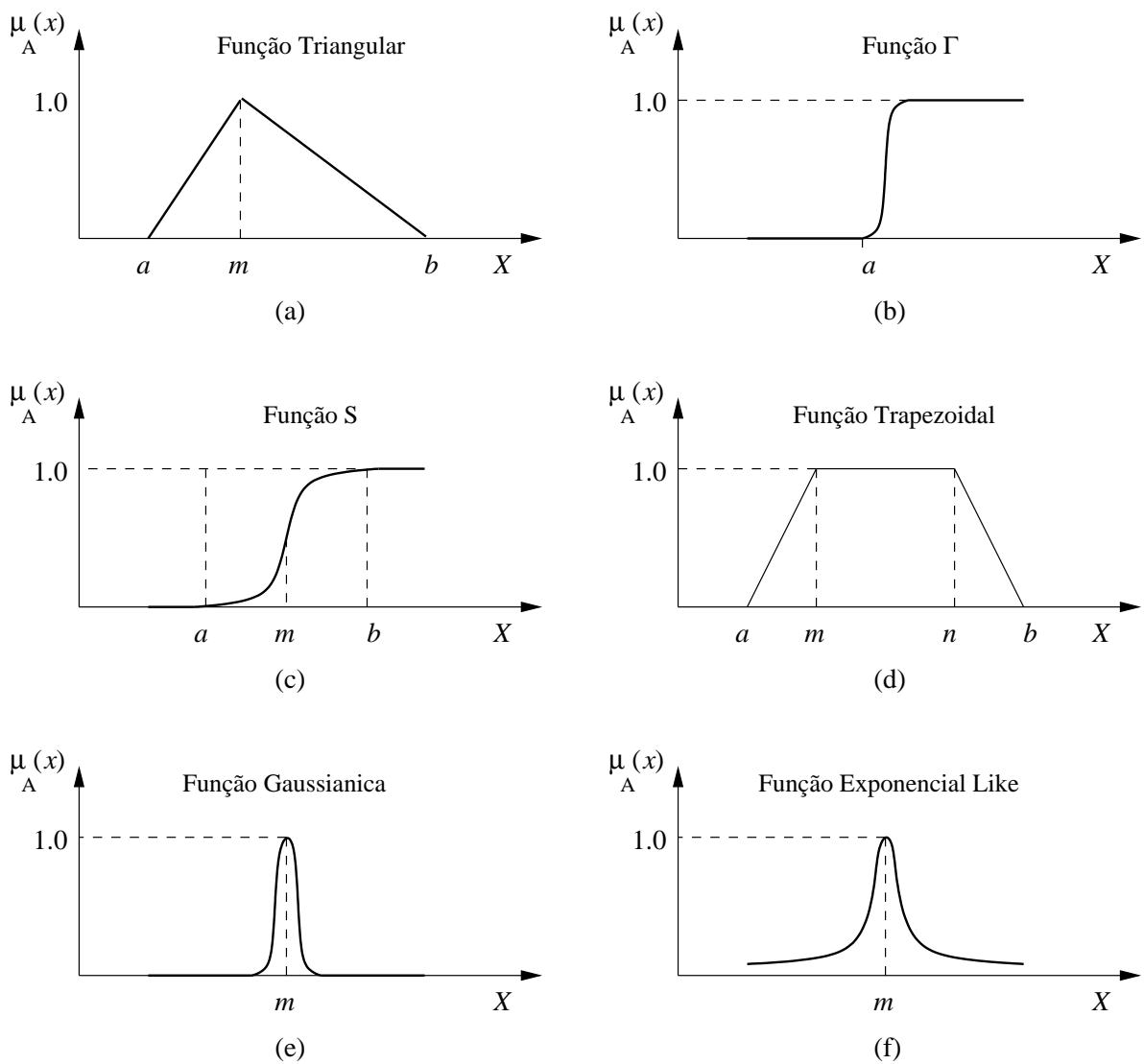


Figura A.1: Funções de pertinência típicas

2 - Função Γ

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \leq a \\ 1 - e^{-k(x-a)^2}, & \text{se } x > a \end{cases} \quad (\text{A.3})$$

onde $k > 0$.

3 - Função S

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & , \text{ se } x \leq a \\ 2\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2 & , \text{ se } x \in [a, m] \\ 1 - 2\left(\frac{x-b}{b-a}\right)^2 & , \text{ se } x \in [m, b] \\ 1 & , \text{ se } x > b \end{cases} \quad (\text{A.4})$$

O ponto $m = a + b/2$ é conhecido como ponto de “crossover” da função S .

4 - Função trapezoidal

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & , \text{ se } x < a \\ \frac{x-a}{m-a} & , \text{ se } x \in [a, m] \\ 1, & \text{ se } x \in [m, n] \\ \frac{b-x}{b-n} & , \text{ se } x \in [n, b] \\ 0 & , \text{ se } x > b \end{cases} \quad (\text{A.5})$$

Esta função pode ser obtida através de parâmetros, neste caso teremos:

$$A(x; a, m, n, b) = \max \{ \min[(x-a)/(m-a), 1, (b-x)/(b-n)], 0 \} \quad (\text{A.6})$$

5 - Função gaussiana

$$\mu_A(x) = e^{-k(x-m)^2} \quad (\text{A.7})$$

onde $k > 0$.

6 - Função exponencial

$$\mu_A(x) = \frac{1}{1 + k(x-m)^2}, \text{ para } k > 1 \quad (\text{A.8})$$

A Figura A.1 mostra exemplos para as funções de pertinência citadas.

A.1.3 Definição conjuntos nebulosos

A teoria dos conjuntos nebulosos é o modelo mais tradicional para o tratamento da informação imprecisa e vaga. Este modelo introduzido em [3], tem por objetivo permitir

gradações na pertinência de um elemento a uma determinada classe, ou seja, possibilita um elemento pertencer com maior ou menor intensidade àquela classe. Basicamente, isso se faz quando o grau de pertinência de um elemento em um conjunto, que na teoria de conjuntos determinísticos é dado por um valor do conjunto $\{0, 1\}$, passa a ser dado por um valor no intervalo dos números reais $[0, 1]$.

De acordo com Zadeh [3] um conjunto nebuloso é caracterizado por uma coleção de objetos com valores de pertinência entre 0 e 1. Onde o valor 0 indica uma condição de exclusão completa, enquanto que 1 indica uma condição de pertinência plena. Os valores de pertinência expressam o grau em que cada objeto é compatível com as propriedades ou características distintas da coleção. Os conjuntos nebulosos são formalmente definidos a seguir.

DEFINIÇÃO : Dado um universo de discurso X , um conjunto nebuloso A de X é definido por uma função de pertinência

$$\mu_A : X \rightarrow [0, 1] \quad (\text{A.9})$$

que associa a cada elemento x de X o grau $\mu_A(x)$, com o qual x pertence a A [Zadeh, 1965]. Então, $\mu_A(x)$ indica o grau de compatibilidade (ou pertinência) entre x e o conceito expresso por A :

- i)* $\mu_A(x) = 1$, x é completamente compatível com A
- ii)* $\mu_A(x) = 0$, x é completamente incompatível com A
- iii)* $0 < \mu_A(x) < 1$, x é parcialmente compatível com A , com $\mu_A(x)$

Logo, o conjunto nebuloso A em X pode ser representado por um conjunto de pares ordenados de um elemento genérico $x \in X$ com grau de pertinência :

$$A = \{(\mu_A(x)/x) | x \in X\} \quad (\text{A.10})$$

O valor de $\mu_A(x)$ descreve um grau de pertinência de x em A . O valor de pertinência representa o grau em que x pertence ao conjunto nebuloso A . Claramente, um conjunto nebuloso é uma generalização do conceito de conjuntos determinísticos cuja função de pertinência assume somente dois valores $\{0, 1\}$, conforme discutido anteriormente.

É importante ressaltar que, embora a função de pertinência tenha alguma semelhança com uma função de probabilidade, o conceito de conjunto nebuloso é

completamente não estatístico em sua natureza, pois a incerteza assumida implicitamente pelo raciocínio probabilístico é uma consequência direta do acaso, enquanto que na teoria dos conjuntos nebulosos, esta incerteza se deve à ausência de limites precisos nas classes de objetos no universo do discurso considerado.

A.1.4 Propriedades de conjuntos nebulosos

Sejam A e B subconjuntos nebulosos do universo X . Considere as seguintes definições:

- União dos conjuntos nebulosos A e B : A união $A \cup B$ de dois conjuntos nebulosos A e B é um conjunto nebuloso definido pela função de pertinência:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x) \quad (\text{A.11})$$

onde

$$\mu_A(x) \vee \mu_B(x) = \begin{cases} \mu_A(x), & \mu_A(x) \geq \mu_B(x) \\ \mu_B(x), & \mu_A(x) < \mu_B(x) \end{cases} \quad (\text{A.12})$$

A expressão A.12 também pode ser escrita na forma $\max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}$.

- Interseção dos conjuntos nebulosos A e B : A interseção $A \cap B$ de dois conjuntos nebulosos A e B é um conjunto nebuloso definido pela função de pertinência:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) \quad (\text{A.13})$$

onde

$$\mu_A(x) \wedge \mu_B(x) = \begin{cases} \mu_A(x), & \mu_A(x) \leq \mu_B(x) \\ \mu_B(x), & \mu_A(x) > \mu_B(x) \end{cases} \quad (\text{A.14})$$

A expressão A.14 também pode ser escrita na forma $\min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}$.

- Complemento do conjunto nebuloso A : O complemento \overline{A} de um conjunto nebuloso A é um conjunto nebuloso definido pela função de pertinência:

$$\mu_{\overline{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (\text{A.15})$$

As Figuras A.2(a), A.3(a) e A.4(a) mostram exemplos da união, interseção e complemento de conjuntos nebulosos, respectivamente. As funções de pertinência para a união, interseção e complemento são derivadas das definições A.11-A.15, respectivamente.

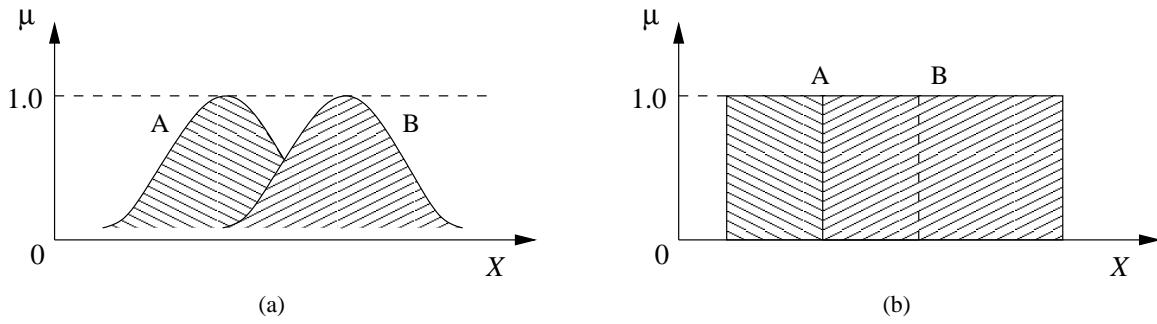


Figura A.2: União: (a) conjuntos nebulosos; (b) conjuntos determinísticos

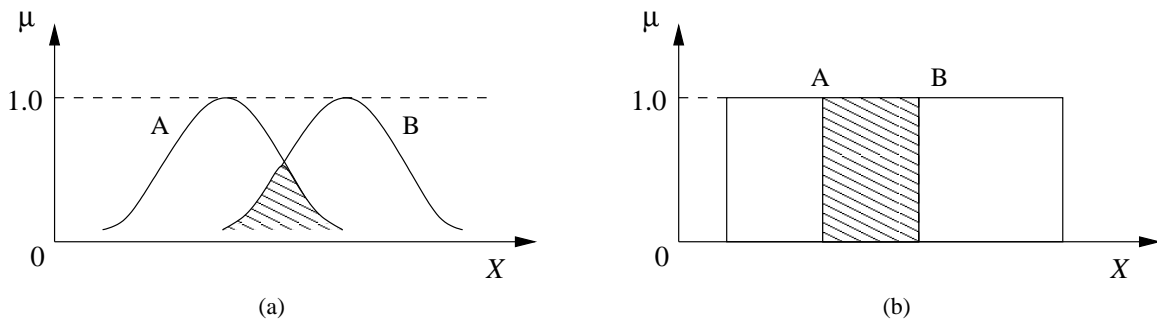


Figura A.3: Interseção: (a) conjuntos nebulosos; (b) conjuntos determinísticos

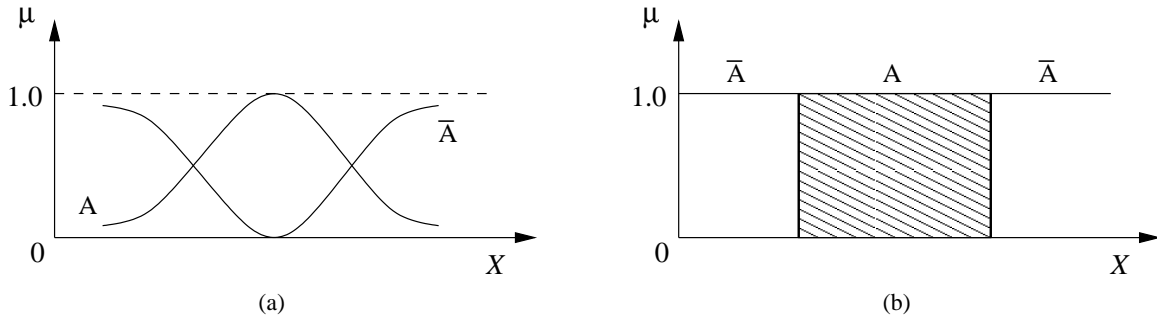


Figura A.4: Complemento: (a) conjuntos nebulosos; (b) conjuntos determinísticos

A.2 Definição de números nebulosos

Números nebulosos modelam quantidades cujos valores são imprecisos, que tendem a ser onipresentes quando descrevem sistemas complexos. Alguns números nebulosos são representados através de uma função cujo domínio é especificado por um conjunto. Cada valor numérico dentro do domínio é associado a um grau de pertinência especificado, onde 0.0 representa o grau de possibilidade menor e 1.0 o grau de possibilidade maior.

Assim os números nebulosos são conjuntos nebulosos com considerações

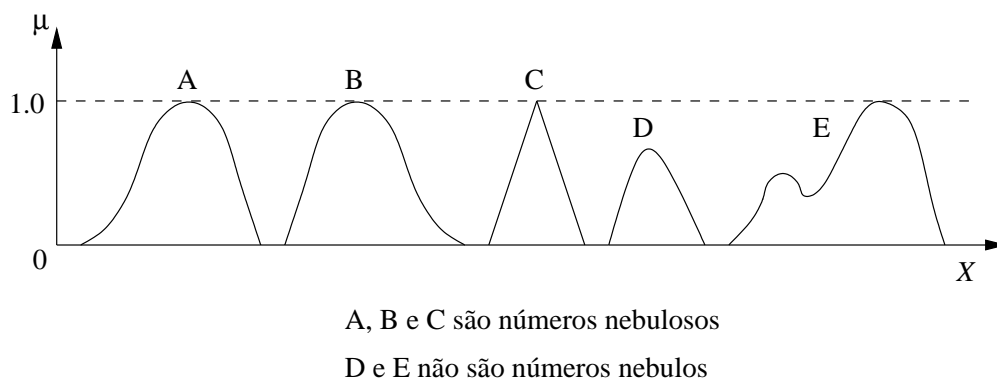


Figura A.5: Número nebuloso

especiais para cada tipo de cálculo. Então, podemos definir operações com números nebulosos utilizando princípios de extensão [24]. A seguir mostramos uma definição de números nebulosos.

DEFINIÇÃO: Chama-se de número nebuloso o conjunto nebuloso A , pertencente ao universo X de números reais, que satisfaz as seguintes condições:

- i)* O conjunto nebuloso A é convexo
- ii)* Somente um elemento x_0 satisfaz a condição : $\mu_A = 1$
- iii)* μ_A é uma função contínua em todo o intervalo

A Figura A.5 mostra exemplos de números nebulosos. Os números nebulosos triangular, trapezoidal e gaussiano têm suas funções conhecidas como funções de pertinência convexa, ou seja, possuem um grau de pertinência inicial zero, aumentando a um valor máximo e ,então, declinando novamente a zero, conforme o aumento do domínio em X .

A.2.1 Operações aritméticas com números nebulosos

Os números nebulosos que são definidos por funções de pertinência trapezoidal, Figura A.2.1, são facilmente determinados por seus parâmetros referidos aos pontos a_1 , a_2 , a_3 e a_4 . Para um número nebuloso trapezoidal A , a seguinte notação pode ser utilizada:

$$A = [a_1, a_2, a_3, a_4] \quad (\text{A.16})$$

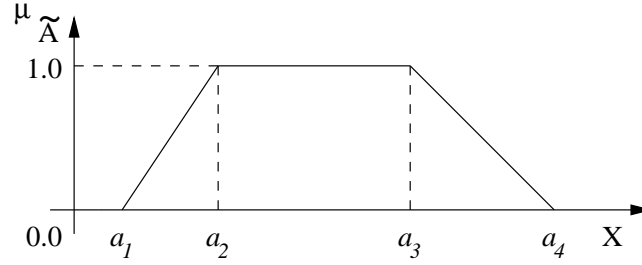


Figura A.6: Função de pertinência trapezoidal

Sendo que a forma exata para definir a função de pertinência trapezoidal já foi descrita em A.1.2. As regras para operações aritméticas entre números nebulosos pode ser definida por princípios de extensão [17] [24]. Então, se um número nebuloso C é uma função de outros dois números nebulosos A e B , isto é, $C = f(A, B)$, o princípio de extensão é dado por:

$$\mu_C(z) = \max[\min \{ \mu_A(x), \mu_B(y) | f(x, y) = z \}] \quad (\text{A.17})$$

Considere dois números nebulosos trapezoidais $A = [a_1, a_2, a_3, a_4]$ e $B = [b_1, b_2, b_3, b_4]$, então, teremos como principais operações:

- Adição:

$$\mu_{A \oplus B}(z) = \sup_{x+y} [\mu_A(x) \wedge \mu_B(y)] \quad (\text{A.18})$$

- Subtração:

$$\mu_{A \ominus B}(z) = \sup_{x-y} [\mu_A(x) \wedge \mu_B(y)] \quad (\text{A.19})$$

- Multiplicação:

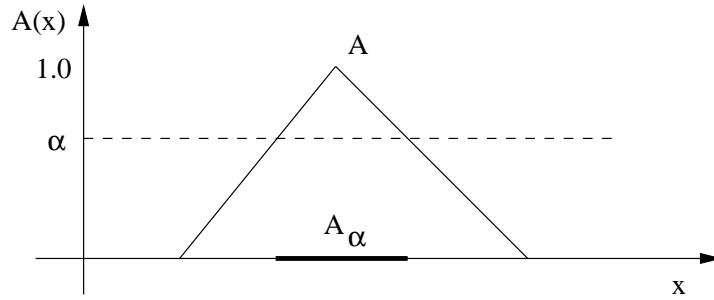
$$\mu_{A \otimes B}(z) = \sup_{x \times y} [\mu_A(x) \wedge \mu_B(y)] \quad (\text{A.20})$$

- Divisão:

$$\mu_{A \oslash B}(z) = \sup_{x \div y} [\mu_A(x) \wedge \mu_B(y)] \quad (\text{A.21})$$

A.2.2 Cortes α

A partir de um conjunto nebuloso A em X , pode-se obter conjuntos determinísticos em X , que representam A de uma forma aproximada [24]. Estes subconjuntos, denotados por A_α e chamados de cortes de nível ou cortes- α são definidos como:

Figura A.7: Corte α

$$A_\alpha = \{x \in X / \mu_A(x) \geq \alpha\} . \quad (\text{A.22})$$

Pode-se ainda dizer que, A_α consiste de elementos de X identificado com A para um grau menor que α . Em particular, o maior nível, $\alpha = 1$ determina um conjunto de X totalmente pertencente a A . Assim, podemos afirmar que $\alpha_1 > \alpha_2$, logo $A_{\alpha_1} \subset A_{\alpha_2}$.

A condição de representação do teorema de que qualquer conjunto nebuloso A será decomposto em uma série de cortes α é dada por:

$$A(x) = \sup_{\alpha \in [0,1]} [\alpha A_\alpha(x)] \quad (\text{A.23})$$

Por outro lado, qualquer conjunto nebuloso pode ser reconstruído por uma família de conjuntos agrupados (assumindo que estes satisfaçam a consistência de confinamento: $\alpha_1 > \alpha_2$, logo $A_{\alpha_1} \subset A_{\alpha_2}$). O teorema conclui que problemas formulados num ambiente que envolva conjuntos nebulosos podem ser resolvidos transformando estes conjuntos nebulosos em outros correspondentes às famílias de cortes α agrupados, determinando soluções para cada um, usando padrões ou técnicas não nebulosas. Subseqüentemente, todos os resultados parciais derivados deste modo podem ser combinados, reconstruindo uma solução ao problema em sua formulação original, baseado em conjuntos nebulosos. Aumentando o número de níveis de quantização dos valores da função de pertinência (quer dizer, os corte α), a reconstrução pode ser feita de uma forma mais detalhada.

B Apêndice

Referências Bibliográficas

- [1] Y. Makarov, D. Hawkins, E. Leuze e J. Vidov, *California ISO Wind Generation Forecasting Service Design and Experience*, Proceedings of the 2002 AWEA Wind Power Conference, Portland, Oregon, 2002.
- [2] S. sandri, *Introdução à Logica Fuzzy*, Minicurso M2, III SBAI, Vitória, 1997.
- [3] L. A. Zadeh, *Fuzzy Sets*, Information and Control, vol. 8, p. 338-353, 1992.
- [4] L. A. Zadeh, *Fuzzy Sets as a Basis for a theory of Possibility*, Fuzzy Sets and Systems, vol 1, p. 3-28, 1978.
- [5] B. Borkowska, *Probabilistic Load Flow*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 93, n° 3, p. 752-755, 1974.
- [6] A. P. Meliopoulos, G. J. Cokkiuides e X. Y. Chao, *A New Probabilistic Power Flow Analysis Method*, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 5, n° 1, p. 182-189, 1990.
- [7] Z. Wang e F. L. Alvarado, *Interval Arithmetic in Power Flow Analysis*, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 7, n° 3, p. 1341-1349, 1992.
- [8] V. Miranda, M. Matos e J. T. Saraiva, *Fuzzy Load Flow - New Algorithms Incorporating Uncertain Generation and Load Representation*, Proceedings of the 10th Power System Computation Conference, vol. 22, Ed. Butterworths, London, 1991.
- [9] V. Miranda e J. T. Saraiva, *Fuzzy Modelling of Power System Optimal Load Flow*, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 7, n° 2, p. 843-849, 1992.
- [10] J. T. Saraiva e V. Miranda, *Representação de Fontes Aditivas em redes de Distribuição de Energia utilizando Conjuntos Imprecisos*, 1º Encontro Luso-Afro-Brasileiro de planejamento e Exploração de Redes de Distribuição de Energia, Comunicação n° 22, Portugal, 1991.

-
- [11] V. Miranda, *Electric Power Applications of Fuzzy Systems*, IEEE Press, Ed M. El-Hawary, Chapter 9, 1998.
- [12] H. Sun, D. Yu e Y. Xie, *Application of Fuzzy Set Theory to Power Flow Analysis with Uncertain Power Injections*, IEEE Summer Meetings, p. 1191-1196, 2000.
- [13] H. H. D. Manguiera, O. R. Saavedra e F. D. Penha, *Análise de Fluxo de Potência em Sistemas de Energia Elétrica Levando em Conta Incertezas Utilizando Multi-linearização*, Anais do V SBAI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, Porto Alegre, Ed. UFRGS, 2001.
- [14] H. H. D. Manguiera, O. R. Saavedra e M. G. da Silva, *Fuzzy Impact of Renewable Sources in Systems of Electric Energy*, 2003 IFAC Symposium on Power Plants and Power Systems Control, Seoul, Korea, 2003.
- [15] H. H. D. Manguiera, O. R. Saavedra e M. G. da Silva, *Impact of Wind Independent Generation on the Integrated Dispatch of the System*, IX Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning, n° 174, Rio de Janeiro, Brazil, 2004.
- [17] W. Pedrycz, *Computational Intelligence: An Introduction*, CRC Press LLC, 1998.
- [18] R. L. Winkler, *Uncertainty in probabilistic risk assessment*, Reliability Engineering and System Safety, Elsevier Science, vol. 54, 1996.
- [19] L. Freris e A. M. Sasson, *Investigation of the Load-flow Problem*, Proceedings of IEE, vol. 115, n° 10, p. 1459-1470, 1968.
- [20] D. G. Luenberger, *Linear and Non-linear Programming*, Addison Wesley, 1984.
- [21] E. Hofer, *When to Separate Uncertainties and when not to Separate*, Reliability Engineering and System Safety, Elsevier Science, vol. 54, 1996.
- [22] G. W. Parry, *Uncertainty in PRA and its Implications for use in Risk-informed Decision Making*, Proceedings of the 4th International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management - PSAM 4, 1998.
- [23] USNRC, *An Approach for Using Probabilistic Risk Assessment in Risk-informed Decisions on Plant-specific Changes to the Licensing basis*, U.S. Nuclear Regulatory Commission - Regulatory Guide 1.174, 1998.

-
- [24] K. Tanaka, *An Introduction to Fuzzy Logic for Practical Applications*, Springer-Verlag New York, New York, USA, 1996.
- [25] Y. Makarov, J. Blatchford, H. Alarian, K. DeMarse, M. O'Hara, M. Scholz, S. Jercich, J. Vidov, E. Leuze, R. Abernathy, D. Hawkins e John Zack *Incorporation of Wind Power Resources into the California Energy Market*, California Independent System Operator Corporation, 2005.
- [26] J. A. Cavalcanti, P. A. Melo, M. S. L. Pinto e P. B. C. Neto, *Planejamento da expansão de redes Eléctricas com Alto Grau de Penetração de Energia Eólica*, IX Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning, n° 176, Rio de Janeiro, Brazil, 2004.
- [27] www.eolica.com.br
- [28] E. H. Mandani e S. Assillon, *An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller*, International Journal of Man-machine Studies, vol 7, p. 1-13, 1975.