



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

Um Método Baseado em Lógica Nebulosa para a Classificação de Contingências em Redes de Energia Elétrica

Autora: Ahda Pionkoski Grilo
Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Favarin Murari

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

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Carlos Alberto Favarin Murari	FEEC/UNICAMP
Prof. Dr. Carlos César Barioni de Oliveira	POLI/USP
Prof. Dr. Carlos Alberto de Castro Junior	FEEC/UNICAMP
Dr. Walmir de Freitas Filho	FEEC/UNICAMP

Campinas, 15 de abril de 2005

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

G879m Grilo, Ahda Pionkoski
Um método baseado em lógica nebulosa para a
classificação de contingências em redes de energia elétrica /
Ahda Pionkoski Grilo. --Campinas, SP: [s.n.], 2005.

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

1. Energia elétrica - Transmissão. 2. Sistemas de energia
elétrica. 3. Lógica difusa. I. Murari, Carlos Alberto Favarin.
II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Titulo em Inglês: A method based on fuzzy logic for selection of contingencies in
electrical energy transmission systems.

Palavras-chave em Inglês: Electric power transmission, Electric power systems e Fuzzy
logic.

Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica.

Banca examinadora: Carlos César Barioni de Oliveira, Carlos Alberto de Castro Junior e
Walmir de Freitas Filho.

Data da defesa: 15/04/2005

Resumo

Nesse trabalho de pesquisa é discutida a utilização do índice de performance como método na análise estática de contingências considerando sobrecargas nas linhas de transmissão e nos transformadores. Segundo a literatura, o índice de performance de segunda ordem é mais utilizado devido ao menor esforço computacional requerido, no entanto, a utilização de tal índice resulta em um determinado tipo de erro na classificação de contingências, chamado mascaramento. Tendo em vista a minimização do mascaramento, é desenvolvido um fator de severidade para cada contingência baseado em lógica nebulosa (*fuzzy logic*), que pode ser utilizado tanto para multiplicar o índice de performance de segunda ordem para evitar o mascaramento, quanto como um índice para classificação de contingências, intitulado Índice Nebuloso ou Índice *Fuzzy* (IF). Os resultados de ambos os índices são satisfatórios apresentando uma minimização do mascaramento e capturando a maioria das contingências severas.

Abstract

This work is intended to discuss the use of performance index in steady state contingency analysis considering overload in transmission lines and transformers. The second order performance index is the most used due to the lowest computational effort, on the other hand, the use of this index results in a miss classification, called masking effect. In order to minimize the masking effect is developed a severity factor to each contingency based on fuzzy logic. This severity factor can be used either to multiply the second order performance index or as a index to classify the contingencies, named Fuzzy Index (IF). The results of both indexes are satisfactory, and they minimize the masking effect.

Dedico este trabalho aos meus pais Braz e Elzira e aos meus irmãos Linda e David.

Agradecimentos

Gostaria de expressar meus agradecimentos:

Ao meu orientador Prof. Dr. Carlos Alberto F. Murari, pela orientação, apoio, amizade e paciência ao longo do desenvolvimento desta pesquisa.

Aos professores do Departamento de Sistemas de Energia Elétrica (DSEE), em especial ao Prof. Dr. Carlos Alberto de Castro e ao Dr. Walmir de Freitas Filho pelo apoio durante o desenvolvimento da pesquisa.

Aos amigos: Adriana, Ana, Miriam, Oranda, Ráy, Irênio, Marcos R., Marcos G., Alberto, Walmir, Enrique, Guerra, Asada, Maurício, Madson, Zé Carlos, Taciana, Marcelo, Hugo, Renato e o pessoal do volei.

À Edna Servidone por ser sempre tão prestativa.

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

Aos meus professores de graduação da Universidade Estadual do Oeste do Paraná pela minha formação.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

A todos aqueles que não tenha mencionado mas cujas contribuições foram necessárias para a conclusão deste trabalho.

Sumário

1	Introdução	1
2	Análise de Segurança Estática em Redes de Energia Elétrica	3
2.1	Operação de Sistemas de Potência	3
2.2	Análise de Segurança	4
2.3	Análise de Contingências	7
2.3.1	Índice de Performance	9
2.3.2	Mascaramento	13
3	Lógica Nebulosa	15
3.1	Breve histórico da Lógica Nebulosa	15
3.2	Conjuntos Nebulosos	16
3.2.1	Definições de conjuntos nebulosos	18
3.2.2	Operações com conjuntos nebulosos [38]	19
3.3	Variáveis Lingüísticas	20
3.4	Sistema de Inferência Nebuloso	21
3.4.1	Fuzificador	22
3.4.2	Regras Nebulosas	22
3.4.3	Funções de Implicação	23
3.4.4	Agregação de Regras Nebulosas	23
3.4.5	Modelo de Mamdani [36]	24
3.4.6	Modelo de Larsen [36]	25
3.4.7	Modelo de Takagi-Sugeno-Kang [36]	26
3.4.8	Modelo de Tsukamoto [36]	27
3.5	Métodos de defuzificação	28

3.5.1	Média dos Máximos	28
3.5.2	Centro de Área	29
3.5.3	Método das Alturas	30
3.6	Teoria das Possibilidades	30
3.7	Fluxo de Carga <i>Fuzzy</i>	31
3.7.1	Operações com números nebulosos utilizando função de pertinência sinusoidal [11]	31
3.7.2	Fluxo de Carga Linearizado <i>Fuzzy</i> Sinusoidal [11]	32
3.7.3	Fluxo de Carga Newton <i>Fuzzy</i> Sinusoidal [11]	34
4	Metodologias Propostas para Classificação de Contingências	36
4.1	Introdução	36
4.2	Aplicação de lógica nebulosa ao problema	39
4.2.1	Aplicação do fator de severidade ao IP_2	42
4.2.2	Índice nebuloso para classificação de contingências	43
4.3	Fluxo de Carga <i>Fuzzy</i> (FCF) na Avaliação de Contingências	44
5	Resultados	46
5.1	Taxa de captura	46
5.2	Vizinhanças consideradas nas simulações	47
5.3	Apresentação dos resultados	47
5.4	Resultados com a aplicação de IP'_2	48
5.4.1	Rede IEEE-14	48
5.4.2	Rede IEEE-30	49
5.4.3	Rede IEEE-118	51
5.4.4	Rede 904 barras	53
5.5	Resultados com aplicação de IF	55
5.5.1	Rede IEEE-14	55
5.5.2	Rede IEEE-30	56
5.5.3	Rede IEEE-118	59
5.5.4	Rede 904 barras	60
6	Considerações Finais	63

6.1	Desenvolvimento da metodologia	64
6.2	Utilização de lógica nebulosa em sistemas de energia elétrica	64
6.3	Análise geral dos resultados	64
6.4	Sugestões para futuros trabalhos	64
A	Limites Térmicos da Rede IEEE-118	69
B	Divulgação da Pesquisa	72

Lista de Figuras

2.1	Funções de um COS	7
2.2	Gráfico IP_2 para carregamentos x_1 e x_2	14
2.3	Contornos do gráfico IP_2 para carregamentos x_1 e x_2 para n diferentes	14
3.1	Funções trapezoidal e triangular	17
3.2	Funções não lineares: sinusoidal e sigmoidal	18
3.3	União nebulosa	19
3.4	Intersecção nebulosa	19
3.5	Exemplo de uma variável lingüística	21
3.6	Esquema de um sistema de inferência	21
3.7	Sistema de inferência de Mamdani	25
3.8	Sistema de inferência de Larsen	26
3.9	Sistema de inferência de Takagi-Sugeno-Kang	27
3.10	Sistema de inferência de Tsukamoto	27
3.11	Método de defuzificação Média dos Máximos	29
3.12	Método de defuzificação Centro de Área	29
3.13	Método de defuzificação das Alturas	30
4.1	Configurações possíveis para contingência	37
4.2	Função de fuzificação para capacidade da vizinhança	40
4.3	Função de fuzificação para capacidade do ramo contingenciado	40
4.4	Conjuntos nebulosos para o fator de severidade	41
4.5	Fluxograma para seleção de contingências utilizando IP'_2	43
4.6	Fluxograma para seleção de contingências utilizando IF	44
4.7	Distribuição de possibilidades para o fluxo ativo na linha 38 - rede IEEE-30	45

Lista de Tabelas

2.1	Classificação dos estados de operação	5
2.2	Classificação das contingências com IP_2	11
2.3	Classificação das contingências com IP_{20}	12
5.1	IP'_2 para IEEE-14	48
5.2	Taxa de captura e fatores de correlação para IP'_2 (IEEE-14)	49
5.3	IP'_2 para IEEE-30	50
5.4	Taxa de captura e fatores de correlação para IP'_2 (IEEE-30)	51
5.5	Taxa de captura e fatores de correlação para IP'_2 (IEEE-118)	51
5.6	IP'_2 para IEEE-118	52
5.7	IP'_2 para a rede de 904 barras	53
5.8	Taxa de captura e fatores de correlação para IP'_2 (904 barras)	55
5.9	IF para IEEE-14	56
5.10	Taxa de captura e fatores de correlação para IF (IEEE-14)	56
5.11	Taxa de captura e fatores de correlação para IF (IEEE-30)	57
5.12	IF para IEEE-30	58
5.13	IF para IEEE-118	59
5.14	Taxa de captura e fatores de correlação para IF (IEEE-118)	60
5.15	IF para a rede de 904 barras	60
5.16	Taxa de captura e fatores de correlação para IF (904 barras)	62
A.1	Limites de fluxo de potência ativa para a rede IEEE-118	69

Capítulo 1

Introdução

A análise de segurança em regime permanente tem um papel fundamental na operação de redes de energia elétrica, pois os sistemas nunca operam com segurança no sentido absoluto da palavra, e sim com um risco calculado, com uma pequena probabilidade de interrupção do serviço, visto que uma probabilidade nula seria inviável economicamente [1]. Como forma de reduzir os riscos de problemas no sistema, devem ser consideradas na operação possíveis falhas em equipamentos e linhas de transmissão.

Cada vez que ocorre a saída de um elemento no sistema (contingência) as correntes nas linhas se redistribuem através da rede e as tensões das barras e os fluxos de potência dos ramos mudam. Como consequência disto podem aparecer sobrecargas em linhas ou transformadores, as quais devem ser eliminadas antes da atuação da proteção, caso contrário, a proteção atuará retirando mais um elemento de operação, podendo produzir um efeito em cascata (desligamento consecutivo de outros componentes), que pode conduzir a um colapso no sistema.

A análise de contingências tem como objetivo identificar as contingências críticas do sistema, e classificá-las por ordem de severidade, o que usualmente é realizado através da utilização de um índice de performance [2–7]. Entretanto, a utilização do índice de performance para sobrecarga de potência ativa nos ramos, pode resultar em um mascaramento (*masking effect*) dos resultados, o que pode fazer com que contingências não-críticas sejam analisadas e contingências críticas não recebam a merecida atenção.

O objetivo deste trabalho é aplicar lógica nebulosa (*fuzzy logic*) [8, 9] para minimizar o mascaramento na análise de contingências que provoquem sobrecargas em ramos de sistemas de transmissão de energia elétrica. A lógica nebulosa é baseada na teoria de conjuntos nebulosos, e constitui uma ferramenta poderosa que vem sendo aplicada em diversos ramos da engenharia desde que foi proposta em 1965 [8]. A lógica nebulosa permite classificar as variáveis do sistema em conjuntos nebulosos, que possuem uma fronteira elástica representada por graus de pertinência. Entretanto, a maior vantagem da aplicação desta lógica neste caso é a capacidade de representação do conhecimento humano através de variáveis lingüísticas e regras nebulosas.

A lógica nebulosa e a teoria de conjuntos nebulosos vêm sendo aplicadas em sistemas de energia elétrica com grande sucesso [10]. Em [11–13] são utilizados números nebulosos no desenvolvimento de um fluxo de carga para representar as incertezas nos valores de geração e

carga nas barras das redes elétricas, e em [14] essas técnicas são aplicadas a sistemas de distribuição. E dando continuidade a esses trabalhos, em [15] foram utilizadas variáveis lingüísticas para representar o estado do sistema de forma mais compatível com a linguagem já utilizada pelos operadores nos centros de controle do sistema, e em [16] foi utilizado um processo de decisão nebuloso, aliando a representação do conhecimento dos operadores com o tratamento de dados imprecisos do sistema para o problema da reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica.

Com relação à análise de contingências, na referência [2] é apresentado um procedimento, baseado em lógica nebulosa, para a seleção de contingências, o qual foi o ponto de partida para a elaboração desta dissertação de mestrado que culminou com o desenvolvimento de um fator para minimizar o mascaramento e de um índice nebuloso para a classificação de contingências.

No Capítulo 2 tem-se uma introdução à Análise de Segurança em Sistemas de Energia Elétrica, em que se destacam as análises mais importantes desenvolvidas em um centro de controle de energia elétrica para uma operação com o mínimo risco possível do sistema.

No Capítulo 3 são descritos os conceitos da lógica nebulosa, sendo primeiramente apresentado um histórico resumido sobre o desenvolvimento desta lógica, seguido da teoria de conjuntos nebulosos e dos modelos lingüísticos mais utilizados.

No Capítulo 4 tem-se a metodologia desenvolvida ao longo deste trabalho de pesquisa, onde é descrito o desenvolvimento de um fator de correção para a minimização do mascaramento, e de um índice de classificação de contingências baseado em lógica nebulosa.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos com o fator de minimização do mascaramento e com o índice nebuloso, e finalmente no Capítulo 6 encontram-se as conclusões e os comentários finais deste trabalho.

Capítulo 2

Análise de Segurança Estática em Redes de Energia Elétrica

De maneira geral, a análise de segurança estática visa verificar se um sistema de energia elétrica está operando em níveis seguros, atendendo satisfatoriamente todos os consumidores, mesmo após a ocorrência de pequenas perturbações. E como parte dessa análise, deve-se realizar estudos com relação ao comportamento do sistema frente a possíveis falhas em equipamentos e linhas de transmissão, identificando as mais críticas.

Nesse capítulo procura-se descrever os principais procedimentos de análise de segurança em regime permanente durante a operação de um sistema de potência.

2.1 Operação de Sistemas de Potência

Do ponto de vista de controle, o objetivo da operação de redes de energia elétrica é manter as magnitudes e os ângulos das tensões nas barras, e conseqüentemente os valores dos fluxos de potência, dentro de limites aceitáveis, garantindo o fornecimento de energia às cargas [1]. E sob esta óptica, pode-se definir que a operação de um sistema de potência se dá pela monitoração e controle de suas grandezas, além de uma eficiente manutenção dos equipamentos, sendo que essas funções são executadas de forma centralizada no respectivo Centro de Operação do Sistema (COS). Os elementos básicos de um COS são [17]:

- o sistema de aquisição de dados e comunicações;
- os sistemas de computadores e programas computacionais específicos;
- as interfaces homem-máquina e
- os operadores.

Sendo o principal objetivo desses elementos, viabilizar a operação do sistema elétrico da forma mais confiável possível, muito esforço vem sendo demandado no sentido de melhorar os equipamentos bem como os programas computacionais nos COS's, automatizando cada vez mais suas funções. Com isso as atuações dos operadores, que variam dependendo do centro

de operação, tendem a diminuir, o que vem se tornando uma necessidade frente ao aumento da complexidade da operação dos sistemas de energia elétrica.

As funções de um COS podem ser divididas em [17]:

- controle da geração;
- controle supervisão;
- funções de segurança em tempo real.

Além do despacho econômico, visando minimizar o custo da operação, o controle da geração compreende também a regulação da frequência e dos intercâmbios, levando-se em conta os requisitos de operação e a confiabilidade.

No controle supervisão (*Supervisory Control and Data Acquisition* - SCADA), informações lógicas e analógicas sobre o estado atual do sistema, obtidas por meio de estações remotas, são transferidas ao COS onde são processadas e apresentadas ao operador, sendo que os mesmos canais de transmissão são utilizados para comandar, por exemplo, chaveamentos de componentes do sistema.

As funções de segurança em tempo real são uma extensão do sistema SCADA, e na maioria dos COS's estão contidas no sistema de gerenciamento de energia (*Energy Management System* - EMS), que é um sistema *software-hardware* complexo e de grande porte, destinado às funções de monitoração, avaliação e otimização a serem executadas em tempo real, para prevenção ou correção de problemas operacionais mantendo uma operação econômica.

2.2 Análise de Segurança

A partir da década de 60, a análise de segurança, que já vinha sendo discutida há algum tempo, começou a ser incorporada na operação de sistemas de energia elétrica. Tal fato foi impulsionado pelo blecaute na região nordeste dos Estados Unidos em novembro de 1965, que teve efeitos negativos significativos [1]. Tal fato suscitou a necessidade de se ampliar o conceito de operação do sistema com a inclusão do conceito de análise de segurança. Esta necessidade era inevitável devido à [18]:

- demanda de energia sempre crescente, a despeito das variações econômicas e desenvolvimentos políticos;
- manutenção de um sistema elétrico robusto que pudesse atender a carga crescente e ainda operar satisfatoriamente sob contingências;
- massiva interligação de sistemas, que se por um lado aumentava a capacidade de despacho de geração, também contribuía para o aumento dos níveis de insegurança da rede em situações de contingências;
- falta de investimentos na expansão da rede elétrica, levando os equipamentos existentes a operarem mais próximos de seus limites físicos de operação.

A partir de então, a operação do sistema passou a ser feita contemplando requisitos de segurança, presentes em três principais funções a serem executadas em um COS [1]:

- monitoração do sistema;
- análise de contingências;
- otimização de ações preventivas e corretivas.

A função da monitoração do sistema consiste em determinar se o sistema de potência está ou não em um estado de operação seguro, através do processamento de dados como: estado de chaves e disjuntores (aberto/fechado), tensões em barramentos, fluxos de potência nos ramos, frequência, níveis de geração, etc.

Na etapa de processamento destes dados ocorre a detecção de violações dos fluxos e das tensões, o que viabiliza uma qualificação do estado de operação em que o sistema se encontra. O estado de operação de um sistema de potência pode ser classificado de acordo com a tabela 2.1 [19].

Tabela 2.1: Classificação dos estados de operação

Estado de operação	Descrição do estado
Seguro	A carga é atendida. Todas as variáveis do sistema estão dentro da faixa normal. Não há violações de limites de operação. Nenhum equipamento é sobrecarregado. Possíveis contingências não causam violações das restrições.
Corretivamente seguro	A carga é atendida. Não há violações de limites de operação. Violações causadas por possíveis contingências podem ser eliminadas por ações de controle sem perda de carga.
Alerta	A carga é atendida. Não há violações de limites de operação e todas as restrições são satisfeitas. O nível de segurança está abaixo de um certo limite de adequação. Algumas violações a serem causadas por possíveis contingências não podem ser eliminadas por ações de controle sem que haja perda de carga.
Emergência corrigível	A carga é atendida. Há violações de limites de operação que podem ser eliminadas por ações de controle sem perda de carga.
Emergência não corrigível	A carga é atendida. Há violações de limites de operação que não podem ser eliminadas sem perda de carga.
Restaurativo	Não há violações de limites de operação. Ocorreu perda de carga.

Nota-se na tabela 2.1 que há situações em que a rede opera com violações de alguns limites de operação, como por exemplo sobrecargas em linhas de transmissão e transformadores e sobre ou subtensões em barramentos, que podem ocorrer tanto em condições normais de operação quanto em situações de contingências. Os limites de operação do sistema e de

equipamentos em muitos casos não são rígidos, no sentido que podem ser violados por algum tempo, sendo que em situações de emergência pode-se ter limites mais abertos. Assim, a capacidade térmica de uma linha de transmissão ou o carregamento máximo de um transformador é diferente quando se consideram as sobrecargas possíveis durante, por exemplo, 3 minutos ou 1 hora.

A eliminação destas violações ocorre através da execução de ações de controle na rede. Por exemplo, pode-se eliminar uma sobrecarga em uma linha de transmissão através de um redespacho da geração, ou uma subtensão através da mudança de um *tap* de um transformador. Essas ações fazem parte de estratégias de controle que podem ser classificadas como:

- controle corretivo - detectada uma violação, tanto em condições normais de operação como sob contingências, ações de controle são executadas para eliminá-la.
- controle preventivo - ações de controle são executadas de forma a mudar o ponto de operação da rede e evitar o surgimento de violações na ocorrência de contingências.

As ações de controle corretivas e/ou preventivas têm seu lugar entre uma série de funções de supervisão e controle da rede que são executadas nos COS's e estão ilustradas na figura 2.1 [18, 19], em que a área sombreada corresponde às funções de análise de segurança.

Parte importante na análise de segurança dos sistemas elétricos de potência é o estudo de contingências. Pode-se definir uma contingência como um evento que ocorre quando um elemento da rede é retirado ou sai de serviço por causas imprevistas ou programadas. Na análise de contingências estudam-se os efeitos sobre o sistema e sua capacidade de permanecer em operação normal sem um elemento. Também, são analisados os problemas que a ausência de um elemento produz como por exemplo: sobrecarga térmica, violações de tensão, perda de carga, entre outras. A análise de contingências é uma função que exige um esforço maior, e foi escolhida para ser estudada mais detalhadamente neste trabalho.

Resumidamente as funções de análise de segurança são processadas conforme a seguinte estrutura [1]:

1. Monitoração do sistema: usando medições em tempo real, é possível identificar se o sistema está no estado normal ou não. Se o sistema está em um estado de emergência vai para o passo 4, ou se ocorreu perda de carga vai para o passo 5.
2. Análise de contingências: se o sistema está no estado normal, determinar se o sistema é seguro ou inseguro com a ocorrência de um conjunto de contingências.
3. Avaliação de contingências: caso exista pelo menos uma contingência que deixe o sistema operando no estado inseguro, determinar a ação preventiva a ser tomada para deixar o sistema seguro.
4. Controle de emergência: executar a ação de controle corretiva apropriada para trazer o sistema de volta ao estado normal.
5. Controle restaurativo: restaurar o serviço para atendimento total das cargas.

A execução das funções de supervisão e controle na operação de redes em tempo real está sujeita a uma restrição severa de tempo, pois a monitoração do estado de operação da

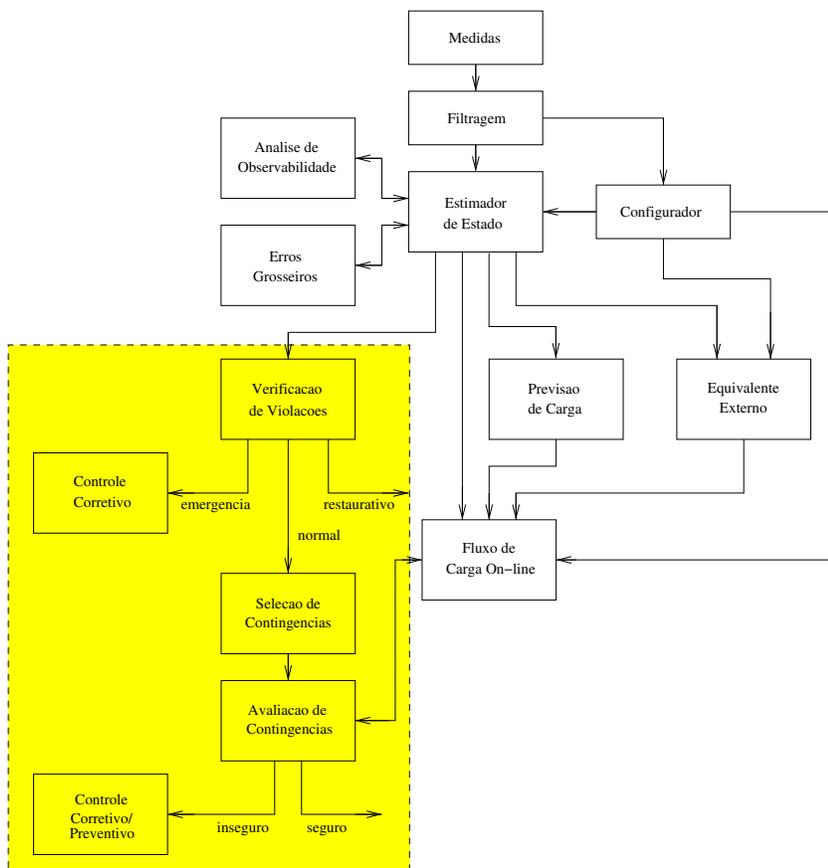


Figura 2.1: Funções de um COS

rede deve ser feita a cada 15 segundos em média [17] e a análise de contingências deve ser executada ciclicamente a intervalos de 15 a 30 minutos [22].

2.3 Análise de Contingências

A análise de contingências constitui-se na identificação e classificação das contingências com maior probabilidade de levarem o sistema para um estado de operação inseguro [2].

A análise de contingências ocorre com a simulação de todas as contingências possíveis, avaliando o impacto de cada uma sobre a operação da rede pela verificação de possíveis violações dos limites operacionais. Os limites operacionais normalmente observados na análise de contingências, são as sobrecargas em linhas de transmissão e transformadores (violação de MW), os limites de tensão nas barras do sistema (sobre ou subtensões) e também o critério da estabilidade de tensão. As simulações podem ser feitas por métodos de cálculo de fluxo de potência ou por análises de sensibilidade.

Para uma rede de grande porte, o elevado número de contingências a serem analisadas faz com que, em princípio, uma análise exaustiva dos efeitos de todas essas contingências seja impraticável. Assim, o problema de análise de contingências, que é uma função a ser

executada durante o ciclo de operação em tempo real, é difundido como um dos processos de análise que demandam maior tempo de processamento.

Um procedimento amplamente adotado é realizar a análise de contingências em três etapas: definição, seleção e avaliação de contingências [20]. Na etapa da definição é estabelecido um modelo para o sistema, que depende de quais grandezas serão analisadas. A etapa de seleção tem o objetivo de reduzir o número de contingências, selecionando as contingências com possibilidade de resultar em sobrecarga para passarem para a etapa de avaliação, a qual corresponde a uma análise mais detalhada da contingência através da execução de um fluxo de carga completo, de modo a identificar as violações de limites e apresentar estas informações ao operador do sistema para que ele ou uma função automática com restrição de segurança responda a cada caso inseguro:

- alterando o estado pré-contingência para minimizar ou eliminar o estado de emergência caso a contingência ocorra;
- desenvolvendo uma estratégia de controle que aliviará a emergência caso a contingência venha a ocorrer; ou
- decidindo não fazer nada baseado no fato que a condição pós-contingência não colocará o sistema em estado de emergência.

Essas ações de controle são definidas na maioria das vezes por programas de fluxo de carga ótimo com restrições de segurança (*Security-constrained Optimal Power Flows - SCOPF*) [21], os quais definem ajustes de controle para a condição base de operação ou pré-contingência, prevenindo violações nas condições de operação pós-contingência. Também podem fornecer ajustes para a potência e a magnitude da tensão em geradores, *taps* dos transformadores, intercâmbio, etc.

A maioria das contingências possíveis de ocorrer em um sistema não representa perigo algum e são facilmente identificáveis. Usando técnicas muito simples, é possível identificar as contingências que obviamente não causam violações ao sistema, e este procedimento, denominado pré-seleção de contingências, tem sido incorporado à análise de contingências [18, 22].

Assim, eliminadas da lista de contingências aquelas identificadas como inofensivas pelo processo de pré-seleção de contingências, procede-se à seleção de contingências, que envolve a identificação daquelas que causam violações de limites, resultando em uma lista de contingências por ordem de severidade.

Este procedimento é responsável por uma grande economia de tempo e esforço computacional, uma vez que elimina da etapa de avaliação de contingências, aquelas que não resultam em violações. Nesse sentido, alguns trabalhos [2, 3, 23–29] têm proposto métodos eficazes para a seleção de contingências.

Uma técnica amplamente adotada na seleção de contingências, consiste em classificá-las utilizando o índice de performance (IP) que reflete a severidade da contingência [2–6], possibilitando que a avaliação de contingências seja desenvolvida a partir da mais perigosa. Utilizando o IP, a seleção de contingências pode ser realizada por dois tipos de métodos [20]:

- Métodos Diretos: calculam o índice da contingência sem obter o estado de operação pós-contingência, sendo que, o estado de operação da rede é levado em conta na obtenção

do índice.

- Métodos Indiretos: calculam o índice da contingência após a obtenção dos estados da rede pós-contingência.

Na maioria das pesquisas envolvendo seleção de contingências, são utilizados métodos indiretos, em que se torna necessário obter o estado de operação pós-contingência, que pode ser obtido através de dois métodos [20]:

- Métodos que utilizam um modelo linearizado para a rede elétrica;
- Métodos que utilizam um modelo não-linear para a rede.

Quando a seleção de contingências é realizada considerando somente o limite de fluxo de potência ativa é mais utilizado o modelo linearizado da rede, em que podem ser utilizados: o fluxo de carga linearizado [17], uma iteração ativa do fluxo de carga desacoplado rápido [30] ou análise de sensibilidade [21]. E quando é utilizado o modelo não-linear para a rede, o estado pós-contingência pode ser obtido com uma iteração do método desacoplado rápido [30] ou com o tradicional fluxo de carga Newton. Assim, nos métodos indiretos o IP é calculado após a obtenção do estado pós-contingência.

Amplamente utilizados na seleção de contingências, existem índices para avaliar os impactos de sobrecarga nos ramos, sub ou sobretensões, estabilidade de tensão e até mesmo estabilidade transitória. Entretanto, este trabalho está restrito ao índice que retrata sobrecargas nos ramos do sistema, o qual é apresentado mais detalhadamente a seguir.

2.3.1 Índice de Performance

O índice de performance (IP) é um escalar que reflete o montante de violações após uma contingência, e é através dele que as contingências com os maiores valores de IP são consideradas as mais severas.

Como uma medida do impacto da contingência, o valor de IP calculado permite distinguir as contingências críticas das não críticas e associar uma severidade relativa para as contingências críticas [21].

Um índice relativo apenas às violações nos limites dos fluxos de potência ativa, é obtido através de (2.1) [2-6]:

$$IP_{2n} = \sum_{l=1}^{NR} W_l \left(\frac{P_l}{\bar{P}_l} \right)^{2n} \quad (2.1)$$

onde

- P_l : fluxo de potência ativa no ramo l ;
- \bar{P}_l : limite de potência ativa do ramo l ;

- NR: número total de ramos da rede;
- n: número inteiro;
- W_l : número real que representa um coeficiente de ponderação para o ramo.

Obs: a função do coeficiente W_l é atribuir uma ponderação maior para os ramos de maior importância para o sistema, sendo que neste trabalho seu valor será sempre unitário.

Uma boa ordenação utilizando este IP, deve classificar como mais severa uma contingência que resulte em uma única linha violada do que uma contingência que resulte em várias linhas carregadas mas não violadas [2]. Em geral, quanto maior o valor de n melhor a ordenação obtida a partir dos valores de IP, sendo que bons resultados são obtidos com $n = 10$ (IP_{20}). Entretanto, é citado na literatura que este valor de n é computacionalmente oneroso sendo comum a utilização de $n = 1$ (IP_2) [2, 3, 6, 7].

Considerando o sistema de 30 barras do IEEE, com limites de fluxos ativos estabelecidos para cada um de seus ramos [31] para identificação de sobrecargas nos mesmos, e também com algumas modificações na distribuição da geração nas barras PV [2], calculou-se o IP_2 a partir do estado de operação da rede pós-contingência obtido por um fluxo de carga completo, sem preocupação, nesse momento, com o tempo computacional.

Na tabela 2.2 é apresentada a classificação das contingências com a utilização de IP_2 , sendo consideradas apenas as contingências simples de todos os ramos que não provocassem ilhamento.

Como se pode observar na tabela 2.2, a contingência 15 está classificada acima da 1, sendo que, a contingência 15 não resulta em qualquer violação enquanto que a 1 resulta em 3 violações. O mesmo ocorre com a contingência 25 que está classificada acima da contingência 10, e com a contingência 18 classificada acima da 41. Entretanto, o caso mais crítico é o da contingência 3, que mesmo resultando em uma violação está classificada entre as últimas. Esse tipo de erro na classificação baseada no IP_2 , é denominado mascaramento, e pode ser evitado com a utilização de um expoente n maior no cálculo de IP.

A tabela 2.3 apresenta a classificação das contingências utilizando o IP_{20} , e para comparação apresenta também os resultados com o IP_2 .

Na tabela 2.3 pode-se constatar que não há contingência, sem violação, classificada acima de alguma que apresente violação, ou seja, não há mascaramento. Entretanto, contingências que resultam em um número menor de violações são classificadas como mais severas que contingências que resultam em um número maior de violações, isto ocorre pois, as sobrecargas dos ramos das contingências com maior número de violações são menores que as das contingências com menor número de violações.

Exemplificando, para a contingência 36 no ramo 28-27 ocorreram violações nos limites de fluxos ativos nas ligações 22-24 (17%) e 24-25 (11%), enquanto que para a contingência 7 no ramo 4-6 ocorreu apenas uma sobrecarga, no ramo 2-6 (23%). Entretanto, como pode ser observado, a contingência 7, embora apresente apenas uma violação é classificada como mais severa, pois a violação desta contingência é maior que as violações da contingência 36.

Tabela 2.2: Classificação das contingências com IP_2

conting.	de - para	Ordem (IP_2)	IP_2	viol.s
36	28 - 27	1	10,7526	2
5	2 - 5	2	10,7095	3
15	4 - 12	3	9,4683	0
1	1 - 2	4	8,9829	3
2	1 - 3	5	8,0500	3
14	9 - 10	6	8,0373	0
7	4 - 6	7	7,9549	1
4	3 - 4	8	7,9286	3
25	10 - 20	9	7,6701	0
10	6 - 8	10	7,3355	1
18	12 - 15	11	7,2912	0
41	6 - 28	12	7,1783	1
24	19 - 20	13	7,1132	0
11	6 - 9	14	7,0723	0
38	27 - 30	15	7,0647	0
6	2 - 6	16	7,0365	1
27	10 - 21	17	6,7588	0
30	15 - 23	18	6,7103	0
19	12 - 16	19	6,6843	0
17	12 - 14	20	6,6244	0
12	6 - 10	21	6,6220	0
37	27 - 29	22	6,6020	0
35	25 - 27	23	6,5174	0
31	22 - 24	24	6,4715	0
28	10 - 22	25	6,4548	0
26	10 - 17	26	6,4244	0
22	15 - 18	27	6,4162	0
21	16 - 17	28	6,3561	0
39	29 - 30	29	6,3309	0
32	23 - 24	30	6,3212	0
29	21 - 22	31	6,2660	0
20	14 - 15	32	6,2484	0
33	24 - 25	33	6,2450	0
40	8 - 28	34	6,2228	0
23	18 - 19	35	6,1970	0
3	2 - 4	36	6,1737	1
8	5 - 7	37	6,0006	0
9	6 - 7	38	5,8895	0

Tabela 2.3: Classificação das contingências com IP_{20}

conting.	de - para	ordem IP_{20}	ordem IP_2	IP_{20}	IP_2	viol.s
1	1 - 2	1	4	729,4097	8,9829	3
5	2 - 5	2	2	320,2158	10,7095	3
2	1 - 3	3	5	282,5395	8,0500	3
4	3 - 4	4	8	205,2337	7,9286	3
7	4 - 6	5	7	65,4796	7,9549	1
36	28 - 27	6	1	35,5134	10,7526	2
10	6 - 8	7	10	22,7547	7,3355	1
41	6 - 28	8	12	7,9797	7,1783	1
3	2 - 4	9	36	2,2489	6,1737	1
6	2 - 6	10	16	1,2687	7,0365	1
25	10 - 20	11	9	0,4169	7,6701	0
15	4 - 12	12	3	0,3499	9,4683	0
9	6 - 7	13	38	0,0766	5,8895	0
38	27 - 30	14	15	0,0660	7,0647	0
37	27 - 29	15	22	0,0585	6,6020	0
24	19 - 20	16	13	0,0333	7,1132	0
17	12 - 14	17	20	0,0248	6,6244	0
18	12 - 15	18	11	0,0232	7,2912	0
19	12 - 16	19	19	0,0210	6,6843	0
14	9 - 10	20	6	0,0199	8,0373	0
30	15 - 23	21	18	0,0197	6,7103	0
22	15 - 18	22	27	0,0196	6,4162	0
21	16 - 17	23	28	0,0196	6,3561	0
28	10 - 22	24	25	0,0193	6,4548	0
27	10 - 21	25	17	0,0193	6,7588	0
39	29 - 30	26	29	0,0192	6,3309	0
23	18 - 19	27	35	0,0189	6,1970	0
32	23 - 24	28	30	0,0188	6,3212	0
31	22 - 24	29	24	0,0186	6,4715	0
20	14 - 15	30	32	0,0185	6,2484	0
8	5 - 7	31	37	0,0184	6,0006	0
29	21 - 22	32	31	0,0184	6,2660	0
40	8 - 28	33	34	0,0183	6,2228	0
33	24 - 25	34	33	0,0181	6,2450	0
26	10 - 17	35	26	0,0178	6,4244	0
35	25 - 27	36	23	0,0178	6,5174	0
12	6 - 10	37	21	0,0167	6,6220	0
11	6 - 9	38	14	0,0160	7,0723	0

2.3.2 Mascaramento

Nesta seção faz-se uma análise quantitativa do mascaramento, e para isso é utilizada a definição de IP normalizada, dada por [2, 3]:

$$IP_{2n} = \sqrt[2n]{\sum_{l=1}^{NR} \left(\frac{P_l}{\bar{P}_l}\right)^{2n}} \quad (2.2)$$

onde

- P_l : fluxo de potência ativa no ramo l ;
- \bar{P}_l : limite de potência ativa do ramo l ;
- NR: número total de ramos da rede;
- n : número inteiro;

Assim, sendo M o número de linhas e $2n$ o expoente a ser utilizado no cálculo do IP, pode-se identificar os seguintes casos para os valores de IP [3]:

- $IP_{2n} \leq 1 \rightarrow$ nenhuma linha com sobrecarga.
- $IP_{2n} > \sqrt[2n]{M} \rightarrow$ ao menos uma linha apresenta sobrecarga.
- $1 < IP_{2n} \leq \sqrt[2n]{M} \rightarrow$ faixa onde pode ocorrer mascaramento.

O comportamento de IP_2 ($n = 1$) com base nessas afirmações, pode ser observado através de um gráfico tridimensional obtido a partir dos valores da relação $\left(\frac{P_l}{\bar{P}_l}\right)$, que representa o carregamento dos ramos. Sendo assim, o gráfico da Figura 2.2 [3] é construído com base na variação de carregamento dos ramos, em que $(x_1$ e $x_2)$ representam os carregamentos de dois ramos da rede que variam no intervalo de $[0,2]$, e IP_2 é o índice calculado para esses ramos.

No gráfico da Figura 2.2 são traçadas duas linhas para dois valores constantes: $IP_2=1$ e $IP_2 = \sqrt{2}$. Estas linhas delimitam a faixa de valores de carregamento dos ramos em que pode ocorrer mascaramento. Nesta figura, os IPs com valores menores que 1, isto é, abaixo da linha de contorno $IP_2 = 1$, indicam que não ocorreram violações de limites. Para valores de IP acima da segunda linha de contorno $IP_2 = \sqrt{2}$, tem-se a ocorrência de violações de limites de fluxos de potência ativa em ao menos uma ligação da rede. Entretanto, nada se pode afirmar sobre as violações dos limites na faixa entre as duas linhas de contorno, que pode conter estados seguros ou inseguros de operação, sendo que, nessa faixa de valores é que se tem a ocorrência do mascaramento.

Na Figura 2.3 são apresentadas as linhas de contorno para $IP_n=1$, para diferentes valores de n . Como pode ser observado, o valor de IP_∞ só é maior que a unidade quando $x > 1$ o que caracteriza violação em um ou mais limites dos ramos. Por outro lado, IP_2 apresenta valores maiores que 1 para valores de $x < 1$. Tal fato, pode ser exemplificado, ao analisar dois casos com carregamentos x_1 e x_2 distintos. No primeiro caso, os dois ramos estão carregados com

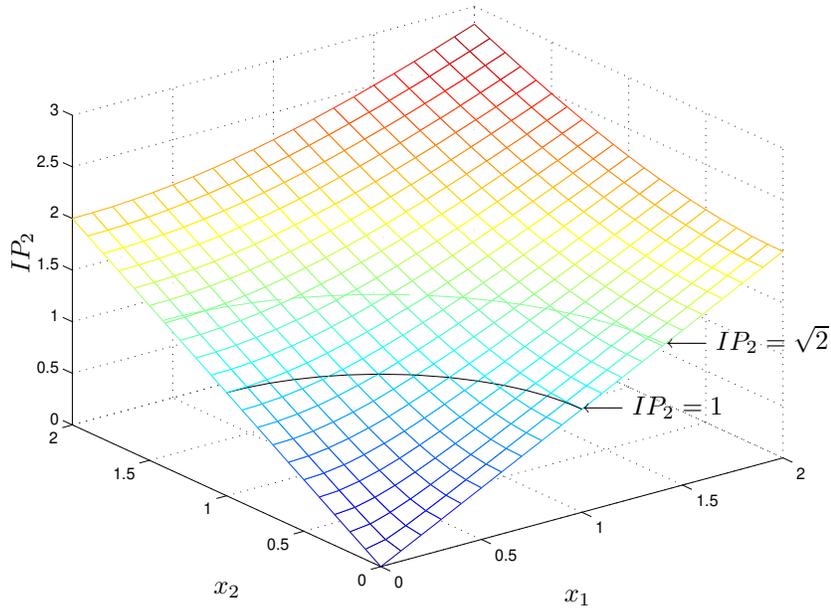


Figura 2.2: Gráfico IP_2 para carregamentos x_1 e x_2

90% de sua capacidade ($x_1 = x_2 = 0,9$), resultando em $IP_2 = 1,2728$. Para o segundo caso, considera-se $x_1 = 60\%$ e $x_2 = 110\%$, resultando em $IP_2 = 1,2530$. Como se pode observar, o IP_2 do segundo caso, no qual ocorreu uma violação de 10%, é menor que o IP_2 do primeiro onde não há violação, e desta forma, se as contingências fossem classificadas por esses índices, teríamos o mascaramento, o que já não ocorre quando se considera o IP_{20} , que resulta em $IP_{20} = 0,9317$ para o primeiro caso e $IP_{20} = 1,1000$ para o segundo caso, obtendo-se uma classificação adequada. Desta forma, a menos que se use um alto valor de n para o cálculo do IP, a maior parte dos valores de IP com $n=1$ ficam na faixa que pode ocorrer mascaramento.

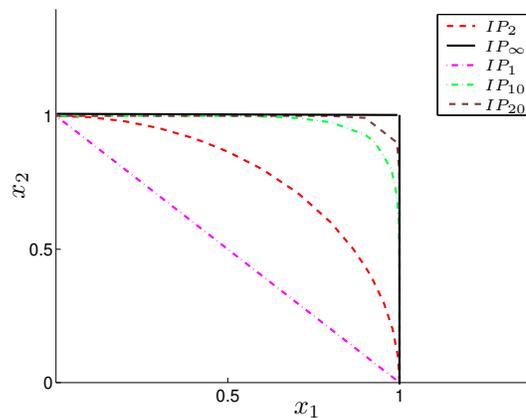


Figura 2.3: Contornos do gráfico IP_2 para carregamentos x_1 e x_2 para n diferentes

Capítulo 3

Lógica Nebulosa

Proposta por Zadeh [8,9], a lógica nebulosa (*fuzzy logic*) possibilita aproximar a lógica executada pelas máquinas com a do raciocínio humano. A lógica humana permite que um elemento pertença parcialmente a um ou mais grupos, enquanto a lógica das máquinas simplesmente classifica um elemento como pertencente ou não a um conjunto. Esta capacidade humana de classificação, ocorre pela especificação de um grau de associação do elemento a um determinado conjunto, e ocorre de maneira natural, baseada no conhecimento prévio do indivíduo.

Em 1965, Lofti Zadeh desenvolveu a teoria de conjuntos nebulosos (*fuzzy sets*) [8] que permite associar para cada elemento um grau de pertinência a um determinado conjunto através de uma função de pertinência. Baseado nesta teoria, Zadeh também desenvolveu a teoria das possibilidades [9] que viabiliza a representação de incertezas. Baseados nesses trabalhos, foram e estão sendo desenvolvidos métodos de análise de redes de energia elétrica que visam a inclusão de incertezas existentes em sistemas de energia elétrica [11–15].

Neste capítulo são apresentados os principais conceitos da lógica nebulosa e dos conjuntos nebulosos, assim como algumas aplicações na área de sistemas de energia elétrica.

3.1 Breve histórico da Lógica Nebulosa

Na década de 60, Lofti A. Zadeh, professor de engenharia elétrica e ciência da computação da Universidade da Califórnia em Berkeley, desenvolveu uma variação da tradicional teoria dos conjuntos e lógica booleana, publicando, em 1965, um artigo com os conceitos dos conjuntos nebulosos [8]. Ainda na década de 60, pesquisadores se esforçaram para estender os fundamentos da lógica nebulosa, introduzindo conceitos novos e desenvolvendo outras abordagens da teoria, como as relações nebulosas, as variáveis lingüísticas, a álgebra com números nebulosos, etc [32].

Em 1972 formou-se no Japão o primeiro grupo de pesquisa em sistemas nebulosos, que se reunia mensalmente para discussões sobre o assunto, e foi responsável pelo primeiro simpósio em sistemas nebulosos no Japão [10]. Em 1975, o professor Ebrahim Mamdani e seu estudante de doutorado Sedrak Assilian, do Queen Mary College, de Londres, obtiveram sucesso utilizando lógica nebulosa para controlar o funcionamento de uma máquina a vapor, sendo que

o controle desta máquina foi feito sem aplicação de fórmulas, segmentando o problema com a utilização de regras nebulosas, o que chamou a atenção dos pesquisadores de todo o mundo e impulsionou uma série de aplicações da lógica nebulosa em problemas de engenharia [10].

Em 1985 ocorreu o desenvolvimento do primeiro *chip* nebuloso por Masaki Togai e Hiroyuke Watanabe, no laboratório Bell (EUA), que apresentaram seu trabalho na Conferência de Miami Beach. Após este evento, muitas empresas japonesas mostraram interesse em inserir o *chip* nebuloso em seus sistemas, mas a idéia de comercializar o *chip* foi rejeitada pela Bell [33].

Em 1987 foi inaugurado com sucesso o primeiro trem controlado com lógica nebulosa no sistema de metrô de Sundai, no Japão. Em 1988 controladores nebulosos dedicados começaram a ser comercializados pela Omron Tateshi Eletrônicos, empresa que teve um papel fundamental na lógica nebulosa no Japão, com 107 das 389 patentes do país até setembro de 1990 [33]. E foi em 1990 que a teoria alcançou popularidade com o lançamento no mercado da primeira máquina de lavar roupas nebulosa, da Matsushita Electric Industrial Co. Hoje é possível encontrar, principalmente no Japão, todo tipo de eletrodoméstico cujo sistema é baseado em controle nebuloso [32].

As aplicações de lógica nebulosa são abrangentes como pode-se ter uma idéia com esse breve histórico, e dentre os fatores que contribuem para isso, pode-se destacar a capacidade da lógica nebulosa de desenvolver raciocínios próximos ao do ser humano, e da facilidade de absorver o conhecimento humano com a utilização das variáveis lingüísticas.

3.2 Conjuntos Nebulosos

Conjuntos nebulosos caracterizam-se por não possuírem fronteiras bem definidas e isto é o que os difere dos conjuntos clássicos, os quais apresentam limitações para solucionar problemas onde as transições de uma classe para outra acontecem de forma suave, ou seja, não ocorre na forma tradicional da lógica binária. Suas definições, propriedades e operações são obtidas da generalização da teoria de conjuntos clássicos, a qual passa a ser vista como um caso particular da teoria de conjuntos nebulosos [32].

Enquanto na teoria clássica dos conjuntos, um dado elemento do universo de discurso (domínio) pertence ou não pertence ao referido conjunto, na teoria dos conjuntos nebulosos cada elemento possui um grau de pertinência associado a um determinado conjunto, podendo um determinado elemento possuir valor de pertinência entre 0 (totalmente excluído) e 1 (totalmente membro), sendo que o valor de pertinência expressa o grau de compatibilidade de cada elemento com as propriedades ou características do referido conjunto.

Um conjunto nebuloso A definido no universo de discurso U é caracterizado por uma função de pertinência μ_A , a qual mapeia os elementos de U para o intervalo $[0,1]$, $\mu_A : U \Rightarrow [0,1]$. Desta forma, a função de pertinência associa a cada elemento x pertencente a U , um número real $\mu_A(x)$ no intervalo $[0,1]$, que representa o grau de pertinência de x em A . A teoria de conjuntos clássicos é um caso particular da teoria de conjuntos nebulosos, pois para os conjuntos clássicos a função de pertinência é um mapeamento do conjunto universo no conjunto $[0,1]$, discriminando dentre todos os elementos de U , aqueles que segundo algum critério pertencem ou não ao conjunto A , dividindo o conjunto universo em duas partes com fronteiras bem definidas.

Pode-se caracterizar um conjunto nebuloso A no universo U , como um conjunto de pares ordenados de um elemento genérico x e seu grau de pertinência $\mu_A(x)$, podendo ser representado na forma $A = \{x, \mu_A(x) | x \in U\}$ [38].

Um conjunto nebuloso discreto pode ser representado pela enumeração de seus elementos junto com seus graus de pertinência, como apresentado na equação (3.1) [38], onde a somatória refere-se à operação união e a notação $\mu_A(x_i)/x_i$ refere-se ao elemento x_i que pertence ao conjunto A com grau $\mu_A(x_i)$. Quando os conjuntos nebulosos são contínuos, sua representação é a própria função de pertinência.

$$A = \sum \mu_A(x_i)/x_i \quad (3.1)$$

A princípio qualquer função da forma $A : \rightarrow [0, 1]$ descreve uma função de pertinência associada a um conjunto nebuloso A , a qual depende não somente do conceito a ser representado, como também do contexto no qual é usado, sendo escolhida pelo usuário com base em sua experiência ou através de um processo de otimização a partir de dados experimentais e/ou obtidos por simulação.

As funções de pertinência podem ser tanto funções lineares por partes quanto não-lineares, e representadas através de vários tipos de funções gráficas: triangular, trapezoidal, exponencial e outras.

As funções lineares por partes são as mais populares, devido à sua simplicidade e dentre elas pode-se destacar as funções trapezoidal e triangular, apresentadas na figura 3.1.

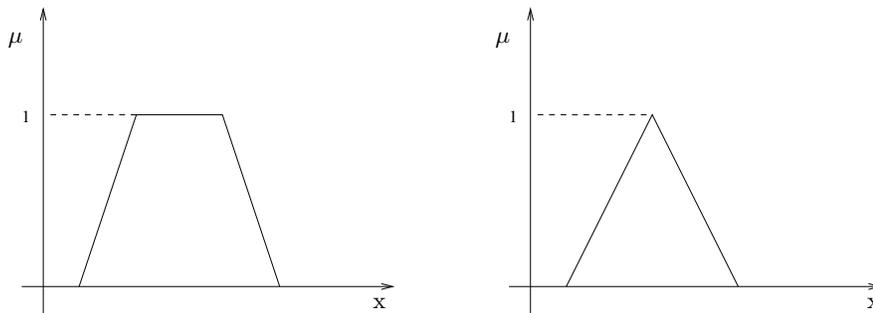


Figura 3.1: Funções trapezoidal e triangular

A figura 3.2 apresenta dois exemplos de funções de pertinência não-lineares: sinusoidal e sigmoideal. A função sinusoidal apresenta uma grande facilidade para a representação de números nebulosos e é utilizada em fluxo de carga *fuzzy* [11].

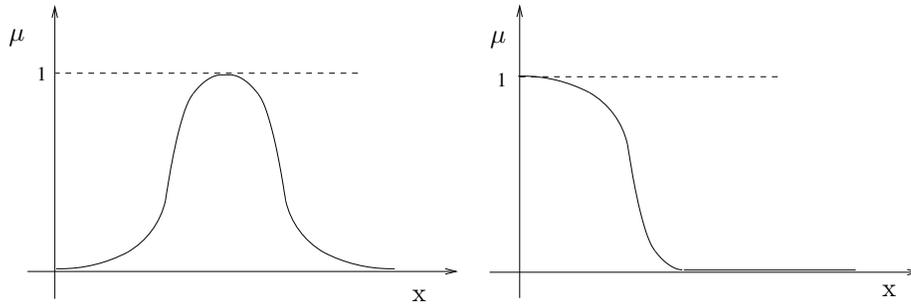


Figura 3.2: Funções não lineares: sinusoidal e sigmoidal

3.2.1 Definições de conjuntos nebulosos

O suporte $S(A)$ de um conjunto nebuloso A é o conjunto clássico de todos os elementos $x \in U$ cuja função de pertinência tem valor diferente de zero, conforme a equação (3.2) [38].

$$S(A) = x \in U | \mu_A(x) > 0 \quad (3.2)$$

A definição de suporte para um conjunto nebuloso é importante, pois se forem considerados como pertencentes a um determinado conjunto nebuloso os elementos com $\mu_A = 0$ teria-se uma quantidade muito grande de elementos nesse conjunto, dependendo do caso, até mesmo infinita.

Em um conjunto nebuloso o elemento $x \in U$, com grau de pertinência $\mu_A(x) = 0,5$ é chamado de ponto de *crossover*, e quando o suporte de um determinado conjunto é um único elemento com $\mu_A = 1$ este conjunto é chamado de *singleton* [38].

O conjunto de elementos que pertencem a um conjunto nebuloso A pelo menos com um grau α é chamado α -nível ou conjunto α -cut.

$$A_\alpha = x \in U | \mu_A(x) > \alpha \quad (3.3)$$

A cardinalidade de um conjunto clássico é o número total de elementos no mesmo, entretanto, em conjuntos nebulosos, os elementos podem pertencer parcialmente a um conjunto, e uma generalização natural da noção clássica de cardinalidade consiste em pesar cada elemento pelo seu grau de pertinência. Sendo assim a cardinalidade de um conjunto nebuloso é definida por [32]:

$$Card(A) = \sum_{x_i} \mu_A(x_i) \quad (3.4)$$

onde A é um conjunto nebuloso e o x_i representa os elementos do conjunto universo com graus de pertinência μ_A .

A altura de um conjunto nebuloso é o maior valor de pertinência da sua função de pertinência, conforme equação (3.5).

$$htg(A) = \max_{x_i} \mu_A(x_i) \quad (3.5)$$

Os conjuntos nebulosos com altura igual a 1 são chamados normais e aqueles cuja altura é inferior a 1 são chamados subnormais.

3.2.2 Operações com conjuntos nebulosos [38]

Sejam A e B conjuntos nebulosos em U, com graus de pertinência μ_A e μ_B , respectivamente. As operações de união, intersecção e complemento são definidas através de suas funções de pertinência.

União: a função de pertinência $\mu_{A \vee B}$ da união $A \vee B$, apresentada na figura 3.3, é definida para todo $u \in U$ na forma:

$$\mu_{A \vee B}(u) = \max\{\mu_A(u), \mu_B(u)\} \quad (3.6)$$

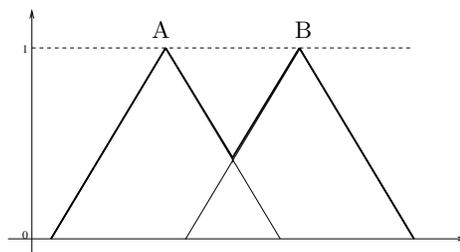


Figura 3.3: União nebulosa

Intersecção: a função de pertinência $\mu_{A \wedge B}$, apresentada na figura 3.4, é definida para todo $u \in U$ na forma:

$$\mu_{A \wedge B}(u) = \min\{\mu_A(u), \mu_B(u)\} \quad (3.7)$$

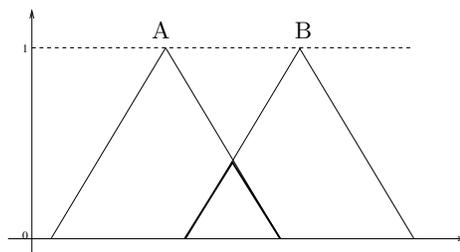


Figura 3.4: Intersecção nebulosa

Complemento: a função de pertinência $\mu_{\bar{A}}$ do complemento do conjunto A é definida

para todo $u \in U$ na forma:

$$\mu_{\bar{A}}(u) = \{1 - \mu_A(u)\} \quad (3.8)$$

Produto Cartesiano: Se A_1, \dots, A_n são conjuntos contidos em U_1, \dots, U_n , respectivamente, o produto cartesiano de A_1, \dots, A_n é um conjunto nebuloso no espaço U_1, \dots, U_n com função de pertinência:

$$\mu_{A_1 \times \dots \times A_n}(u_1, u_2, \dots, u_n) = \min\{\mu_{A_1}(u_1), \dots, \mu_{A_n}(u_n)\} \quad (3.9)$$

3.3 Variáveis Lingüísticas

Uma variável lingüística é expressa por um termo lingüístico, o qual fornece conceito à variável, expressando-a qualitativamente, e por uma função de pertinência, que a representa quantitativamente. A variável lingüística é caracterizada por $\{n, T, X, m(t)\}$, onde n é o nome da variável (por exemplo, temperatura, pressão, febre, etc.), T é o conjunto de termos lingüísticos de n (elevado, baixo, pouco, extenso, etc), X é o domínio (Universo) de valores de n sobre o qual o significado do termo lingüístico é determinado e $m(t)$ é uma função semântica que assinala para cada termo lingüístico $t \in T$ o seu significado, que é um conjunto nebuloso em X (ou seja, $m: T(X)$ onde (X) é o espaço dos conjuntos nebulosos).

A variável lingüística é expressa em termos de uma variável básica, que denota a sua medida. Esta medida pode ser quantitativa, no caso em que é possível o uso de instrumentos de medida, ou pode ser expressa de forma qualitativa.

Os termos lingüísticos são usados para expressar conceitos e conhecimentos na comunicação humana, e em muitas áreas eles são a forma mais importante (quando não a única) de quantificar os dados/informações. Cada termo lingüístico tem a ele associado um conjunto nebuloso que o caracteriza.

As variáveis lingüísticas são expressas dentro de um certo domínio de valores. Em geral, é o especialista quem define esse domínio e realiza sua participação. Nesse contexto, o papel do especialista torna-se fundamental na modelagem nebulosa [32].

Na figura 3.5 tem-se um exemplo de variável lingüística, em que se representa o fluxo de potência ativa em uma linha de transmissão.

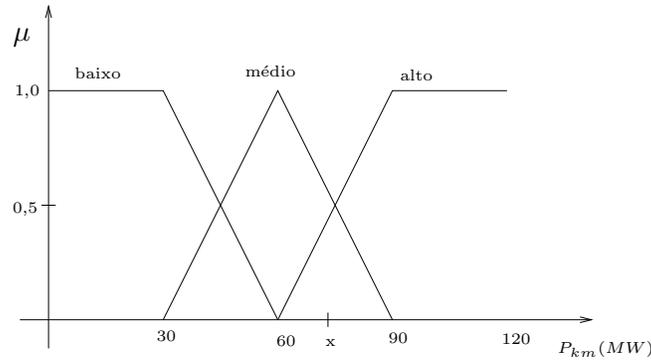


Figura 3.5: Exemplo de uma variável lingüística

O nome da variável é fluxo, os termos lingüísticos ($t \in T$) que atribuem um significado a fluxo são: baixo, médio e alto, e o domínio (X) da variável é o intervalo $[0, 120]$. Cada termo lingüístico tem a ele associado um conjunto nebuloso $m(t)$ que o caracteriza. Neste exemplo, a variável é medida através de instrumentos e representada através de variáveis lingüísticas.

3.4 Sistema de Inferência Nebuloso

Um sistema de inferência nebuloso é capaz de simultaneamente trabalhar com dados numéricos e conhecimento lingüístico. A figura 3.6 mostra um sistema nebuloso amplamente utilizado [37], que mapeia entradas *crisp* em saídas *crisp*.

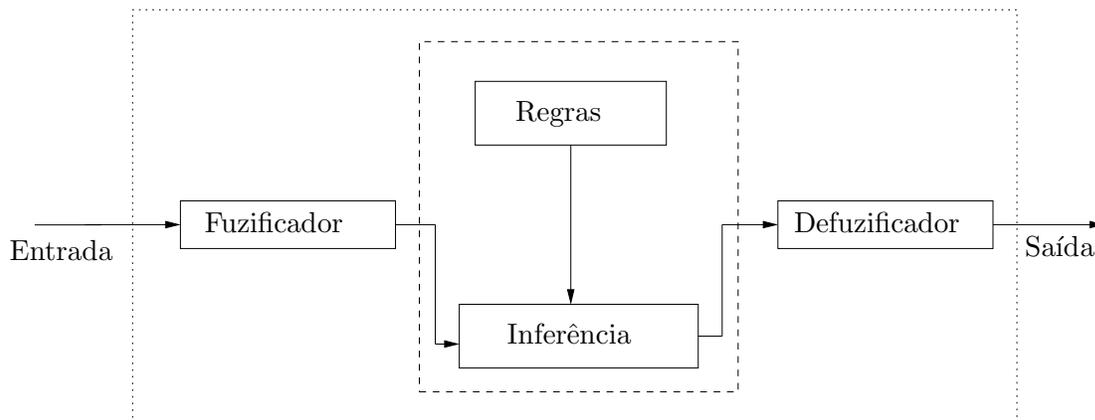


Figura 3.6: Esquema de um sistema de inferência

O sistema nebuloso apresentado na figura 3.6 é composto por 4 elementos: regras, fuzificador, máquina de inferência e defuzificador, cujos objetivos resumidamente são [37]:

- Fuzificador: mapeia os números *crisp* em conjuntos nebulosos, que são necessários para a ativação das regras que estão em termos de variáveis lingüísticas.

- Regras nebulosas: relaciona as variáveis lingüísticas de entrada com as de saída.
- Máquina de inferência: mapeia os conjuntos nebulosos de entrada em conjuntos nebulosos de saída, e define o modelo para combinação das regras através de um método de inferência para definir um só conjunto nebuloso de saída.
- Defuzificador: mapeia o conjunto nebuloso de saída em um número *crisp*.

A principal vantagem desse tipo de sistema é que embora os valores da entrada e da saída sejam *crisp*, o conjunto de regras permite uma abordagem qualitativa do problema representada por variáveis lingüísticas.

3.4.1 Fuzificador

A etapa de fuzificação consiste basicamente na associação de graus de pertinência para as variáveis de acordo com as funções de pertinência de cada conjunto nebuloso.

3.4.2 Regras Nebulosas

Uma regra nebulosa é um tipo de declaração de implicação nebulosa ou declaração condicional nebulosa, que descreve uma relação entre as variáveis lingüísticas de entrada, que representam o estado do sistema, e as variáveis de saída. Cada regra nebulosa, da mesma forma que uma afirmação clássica, é composta por uma parte antecedente (a parte Se) e uma parte conseqüente (a parte Então), resultando em uma estrutura do tipo [35]:

Se {antecedente} Então {conseqüente}

Tanto o antecedente quanto o conseqüente são proposições nebulosas e desta forma o antecedente define uma região nebulosa no espaço das variáveis de entrada do sistema, enquanto o conseqüente descreve uma região no espaço das variáveis de saída do sistema.

O conjunto de regras deve ser capaz de descrever um sistema em suas várias possibilidades, sendo essas possibilidades retratadas através de variáveis lingüísticas. A utilização do conceito lingüístico para a representação do conhecimento, facilita a expressão do conhecimento humano empírico e heurístico, uma vez que é utilizada a própria linguagem de comunicação.

Uma vez construído o conjunto de regras nebulosas, faz-se necessária uma máquina de inferência para extrair dele a resposta final. Existem vários métodos de inferência possíveis (Mandani, Larsen, etc,...) [36] e a escolha por um deles depende do sistema que está sendo analisado. O método de inferência é formado pelas funções de implicação e por um sistema de agregação de regras. As funções de implicação definem o grau de pertinência da saída de uma regra considerando os graus de pertinência da entrada, e o sistema de agregação de regras tem a função de obter uma saída ou um conjunto nebuloso de saída resultante de duas ou mais regras.

3.4.3 Funções de Implicação

Considerando duas entradas x e y para as quais são associados graus de pertinência para dois conjuntos nebulosos A e B , respectivamente, a função de pertinência $\mu_R(x, y)$ que define a implicação, pode ser obtida através das funções de pertinência individuais $\mu_A(x)$ e $\mu_B(y)$ por vários métodos, destacando-se [36]:

- Clássico usado por Zadeh

$$\mu_R(x, y) = \max\{\min[\mu_A(x), \mu_B(y)], 1 - \mu_A(x)\} \quad (3.10)$$

- Mínima correlação ou implicação de Mamdani

$$\mu_R(x, y) = \min[\mu_A(x), \mu_B(y)] \quad (3.11)$$

- Implicação de Lukasiewicz

$$\mu_R(x, y) = \min\{1, [1 - \mu_A(x) + \mu_B(y)]\} \quad (3.12)$$

- Implicação de Brouwerian

$$\mu_R(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{para } \mu_A(x) \leq \mu_B(y) \\ \mu_B(y), & \text{outros} \end{cases} \quad (3.13)$$

- Implicação R-SEQ (seqüência lógica padrão):

$$\mu_R(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{para } \mu_A(x) \leq \mu_B(y) \\ 0, & \text{outros} \end{cases} \quad (3.14)$$

- Implicação somas limitadas:

$$\mu_R(x, y) = \min\{1, [\mu_A(x) + \mu_B(y)]\} \quad (3.15)$$

- Implicação correlação produto

$$\mu_R(x, y) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(y) \quad (3.16)$$

3.4.4 Agregação de Regras Nebulosas

A maioria dos sistemas envolvem mais de uma regra, podendo as regras serem processadas em paralelo, ou seja, todas as regras são consideradas ao mesmo tempo. Com isso faz-se necessário um método de agregação de regras, podendo-se citar dois, o sistema de regras conjuntivo e o sistema de regras disjuntivo [36].

O sistema de regras conjuntivo é aquele em que as regras devem ser satisfeitas conjuntamente, ou seja, as regras são agregadas pelos conectivos "E". Nesse caso, a saída agregada

é encontrada pela intersecção de todas as regras conseqüentes individuais y^i , para $i=1,2, \dots,r$, ou seja:

$$y = y^1 \wedge y^2 \wedge \dots \wedge y^r \quad (3.17)$$

que são definidas pelas funções de associação,

$$\mu_y(x) = \min(\mu_{y^1}(x), \mu_{y^2}(x), \dots, \mu_{y^r}(x)) \quad (3.18)$$

onde x é a entrada e X é o seu universo de discurso.

O sistema de regras disjuntivo requer que no mínimo as regras sejam agregadas pelo conectivo "OU". Nesse caso, a saída agregada é encontrada pela união das contribuições individuais de cada regra, ou seja:

$$y = y^1 \vee y^2 \vee \dots \vee y^r \quad (3.19)$$

que são definidas pelas funções de associação

$$\mu_y(x) = \max(\mu_{y^1}(x), \mu_{y^2}(x), \dots, \mu_{y^r}(x)) \quad (3.20)$$

A função de implicação e o método de agregação utilizados para inferir as regras nebulosas definem o método de inferência a ser utilizado. Existem diversos tipos de inferência para relacionar as entradas e saídas do conjunto de regras. Estes métodos permitem obter uma resposta que tanto pode ser um valor numérico clássico, quanto um conjunto nebuloso ou um funcional, a depender do tipo de conseqüente utilizado. Quando é necessário que a saída do sistema seja um número, realiza-se um processo de defuzificação. Os modelos de inferência mais utilizados são apresentados na seqüência.

3.4.5 Modelo de Mamdani [36]

Neste modelo as implicações nebulosas são modeladas pelo operador de Mamdani (mínima correlação) e as regras são agregadas através do operador de união (máximo). A saída agregada para r regras corresponde a:

$$\mu_{B_n^k}(\alpha(i), \alpha(j)) = \max\{\min[\mu_{A_{n1}^k}(\alpha(i), \mu_{A_{n2}^k}(\alpha(j))]\}, \quad \text{para } k = 1, 2, \dots, r \quad (3.21)$$

onde, A_{n1}^k e A_{n2}^k representam os k -ésimos conjuntos difusos antecedentes e B_n^k representa o k -ésimo conjunto difuso conseqüente para a n -ésima regra com entradas $\alpha(i)$ e $\alpha(j)$. A representação gráfica desta interpretação está na figura 3.7.

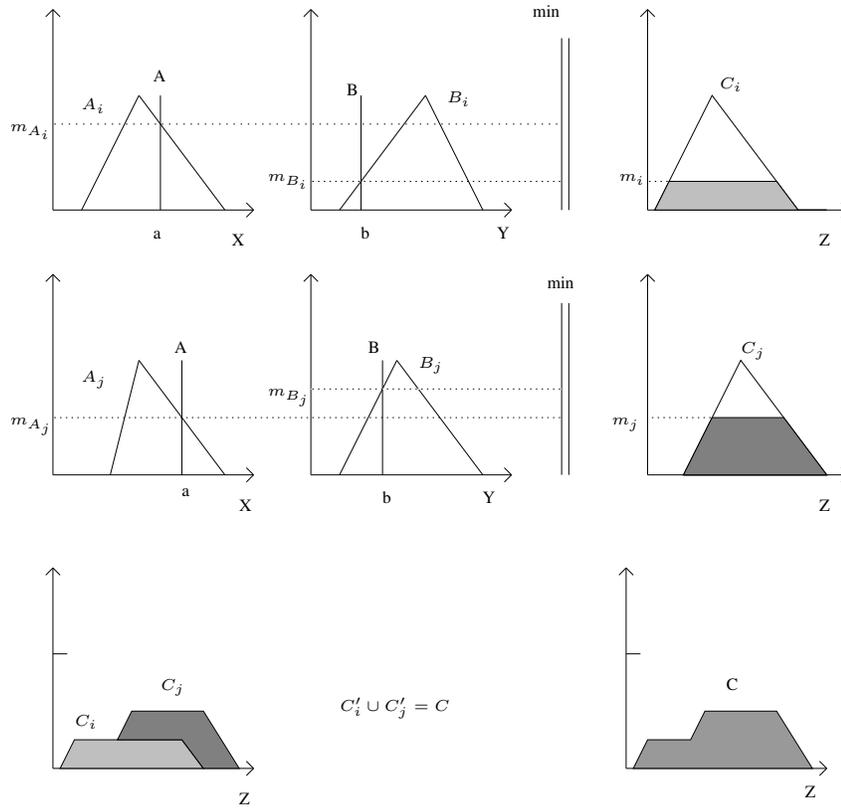


Figura 3.7: Sistema de inferência de Mamdani

3.4.6 Modelo de Larsen [36]

É uma variação do modelo de Mamdani, em que ao invés de utilizar-se do operador de Mamdani nas implicações nebulosas das regras, é utilizado o operador de Larsen (correlação produto). Portanto o modelo nebuloso de Mamdani pode ter variações se forem feitas diferentes escolhas entre os conectivos AND e OR. Na figura 3.8 está representado o raciocínio nebuloso do modelo de Larsen.

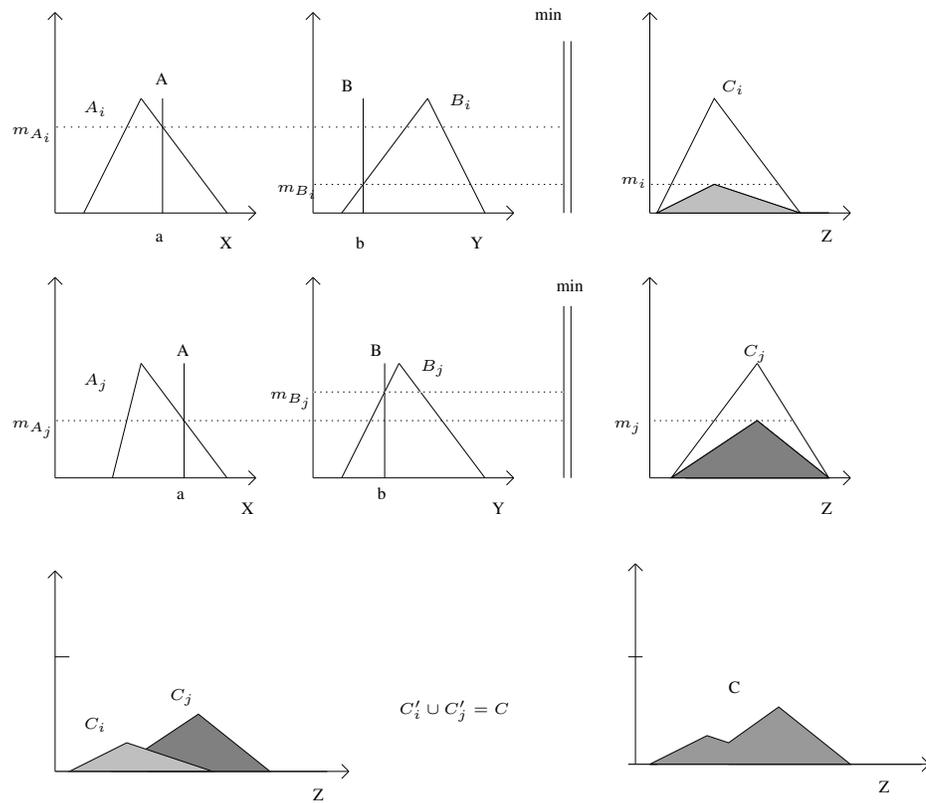


Figura 3.8: Sistema de inferência de Larsen

3.4.7 Modelo de Takagi-Sugeno-Kang [36]

Este modelo associa nos conseqüentes um funcional ao invés de conjuntos nebulosos. Neste modelo, as regras antecedentes descrevem regiões nebulosas no espaço de entrada e as regras conseqüentes são funções exatas do modelo de entrada, ou seja:

Se x_1 é A_1 e ... e x_n é A_n Então $y_i = f(x_1, \dots, x_n)$

onde A_1 até A_n são conjuntos difusos atingidos pelos respectivos valores físicos (exatos) x_1 até x_n ; y_i é a i -ésima relação nebulosa devido à regra e f normalmente representa uma combinação linear aplicada aos valores exatos.

A vantagem deste modelo é a sua capacidade em descrever sistemas tecnológicos complexos, permitindo decompô-los em subsistemas mais simples. Na figura 3.9 tem-se sua representação.

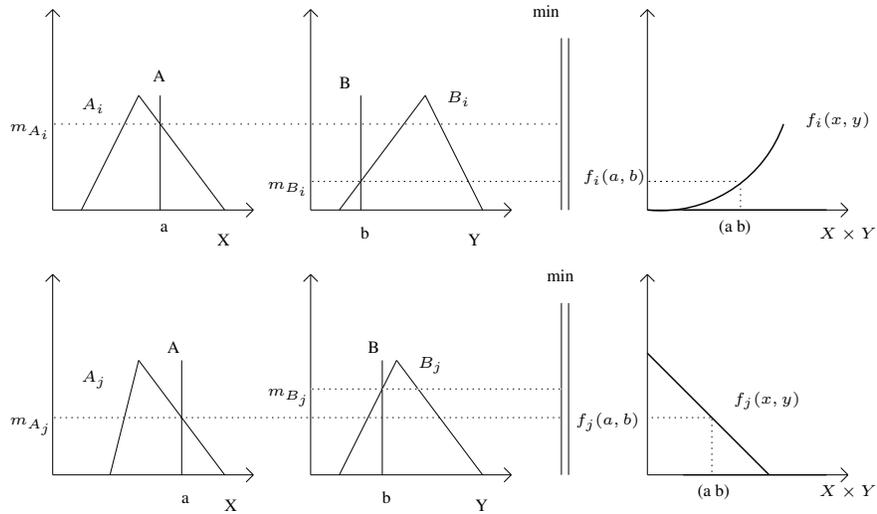


Figura 3.9: Sistema de inferência de Takagi-Sugeno-Kang

A saída deste modelo é dada por:

$$z = \frac{m_i f_i(a, b) + m_j f_j(a, b)}{m_i + m_j} \tag{3.22}$$

3.4.8 Modelo de Tsukamoto [36]

Neste modelo todas as funções de pertinência são monotônicas. O centro de massa é utilizado para obter a saída, que no caso já é definida. A figura 3.10 representa o raciocínio deste modelo.

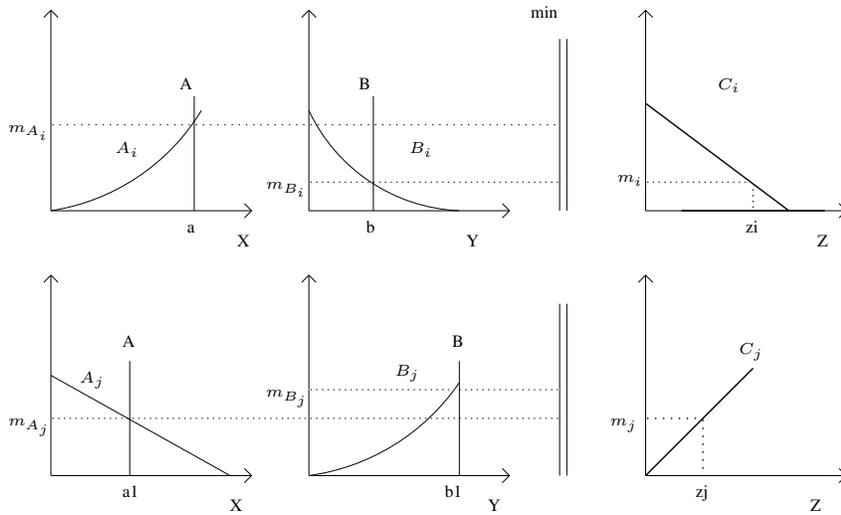


Figura 3.10: Sistema de inferência de Tsukamoto

E a respectiva saída deste modelo é dada por:

$$z = \frac{m_i z_i + m_j z_j}{m_i + m_j} \quad (3.23)$$

3.5 Métodos de defuzificação

Quando é necessário que a saída de um sistema nebuloso seja um escalar, realiza-se um processo de defuzificação, o qual é um procedimento que permite interpretar a distribuição de possibilidades da saída de um modelo lingüístico nebuloso de forma quantitativa, ou seja, ela fornece um valor numérico que representa o conjunto nebuloso resultante. Existem muitas técnicas de defuzificação e entre as mais utilizadas estão [36]:

- Média dos Máximos;
- Centro de Área;
- Método das Alturas.

3.5.1 Média dos Máximos

O método de defuzificação da Média dos Máximos (MM) calcula a média de todos os valores de saída que tenham os maiores graus de possibilidade. Supondo que y é uma conclusão nebulosa que deve ser defuzificada, e que para y são associados graus de pertinência para o conjunto A . O valor de saída y_0 obtido pelo método de defuzificação MM pode ser expresso da seguinte forma:

$$y_0 = \frac{\sum_{y^* \in P} y^*}{|P|} \quad (3.24)$$

onde P é o conjunto de todos os valores de saída com máximos grau de possibilidade em A , ou seja,

$$P = \{y^* | \mu_A(y^*) = \sup_y \mu_A(y)\} \quad (3.25)$$

e $|P|$ é a cardinalidade do conjunto P , ou seja, o número de elementos de P .

A Figura 3.11 apresenta um exemplo desse método. Note que, se P é um intervalo, então a técnica MM de defuzificação fornece o ponto médio desse intervalo.

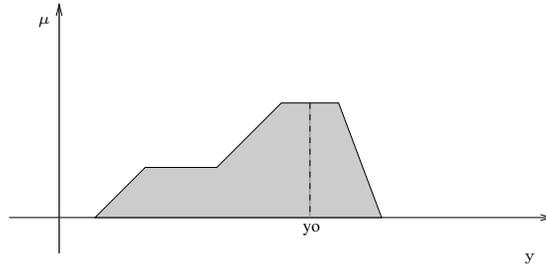


Figura 3.11: Método de defuzzificação Média dos Máximos

A principal limitação deste método é não considerar a forma total do conjunto nebuloso de saída. Sendo assim, duas distribuições de possibilidades que apresentem diferentes formas, porém o mesmo conjunto de valores com grau de pertinência máximo, quando defuzzificadas com esta técnica fornecerão o mesmo valor clássico.

3.5.2 Centro de Área

Centro de Área (CA) é a técnica de defuzzificação mais comumente usada, sendo também citada na literatura como método do Centro de Gravidade ou Centróide. Diferentemente do MM, para calcular o valor clássico representativo, esta técnica considera toda a distribuição de possibilidades de saída do modelo. O procedimento é similar ao usado para calcular o centro de gravidade em física, ao se considerar a função de pertinência $\mu_A(x)$ como densidade de massa de x . Por outro lado, este método pode ser compreendido como uma média ponderada, onde $\mu_A(x)$ funciona como uma ponderação do valor x . Se x é discreto, então a defuzzificação da conclusão nebulosa A é dada por:

$$y_0 = \frac{\sum x \mu_A(x) \cdot x}{\sum x \mu_A(x)} \quad (3.26)$$

Da mesma forma, se x é contínuo, então:

$$y_0 = \frac{\int \mu_A x dx}{\int \mu_A(x) dx} \quad (3.27)$$

A Figura 3.12 exemplifica o método de defuzzificação CA.

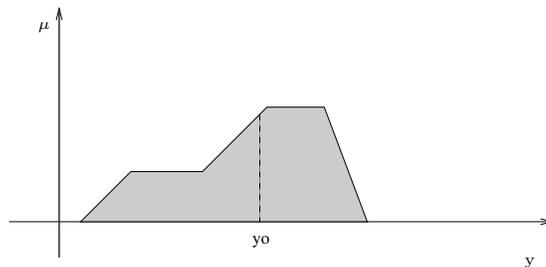


Figura 3.12: Método de defuzzificação Centro de Área

3.5.3 Método das Alturas

O Método das Alturas (MA) pode ser visto como uma aproximação do método Centro de Área. Ele é realizado em dois passos: primeiro, para cada regra em que é associado um conjunto nebuloso C encontra-se o conseqüente clássico $y = c_i$, onde C_i é o centro de área do conjunto C_i . E então, a defuzificação é aplicada para as regras com os conseqüentes clássicos através da expressão:

$$y_o = \frac{\sum_{i=1}^n m_i c_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (3.28)$$

onde m_i denota o grau de ativação da i -ésima regra e n é o número de regras nebulosas do modelo. Uma vez definidas as regras, os valores c_i estarão determinados e se manterão fixos durante toda a inferência, o que simplifica muito o cálculo do valor clássico representativo, reduzindo o esforço computacional. A Figura 3.13 ilustra um exemplo desse método.

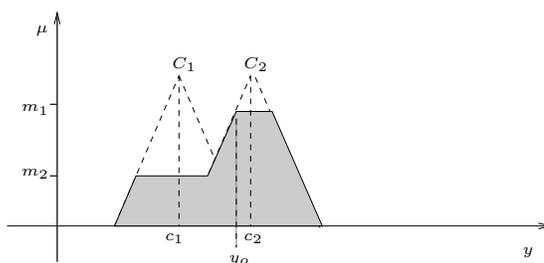


Figura 3.13: Método de defuzificação das Alturas

3.6 Teoria das Possibilidades

Com o desenvolvimento da teoria de conjuntos nebulosos, foi possível também o desenvolvimento da Teoria de Possibilidades [9], que trouxe uma grande flexibilidade no momento de codificar a informação incerta da variável de interesse.

Assim como ocorre com os conjuntos clássicos, quando uma variável lingüística é definida, ela é restrita a um conjunto de valores. A diferença entre as duas abordagens é justamente a noção de valores possíveis e impossíveis, que na lógica nebulosa é expressa por diferentes graus. Assim, os conjuntos nebulosos generalizam a distinção binária entre possível e impossível, gerando vários graus de possibilidade [32].

Através da Teoria de Possibilidades, a informação fornecida por uma fonte de conhecimento sobre quão pertinente um elemento x é de um universo X , é convertida para a forma de uma distribuição de possibilidades, sendo esta igual à função de pertinência para uma mesma variável.

A Teoria de Possibilidades viabiliza, por exemplo, a representação das imprecisões nos valores de potências ativas e reativas nas barras da rede, com repercussão nos valores dos ângulos e das magnitudes das tensões nodais, nos fluxos e nas perdas de potência nos ramos, o que motivou o desenvolvimento do fluxo de carga *fuzzy* [11].

3.7 Fluxo de Carga *Fuzzy*

Para efetuar simulações com um fluxo de carga convencional, necessita-se dos dados do sistema para o qual se deseja estimar as magnitudes e os ângulos das tensões nodais, os fluxos de potência, as potências geradas e as perdas. Alguns destes dados são estimados com maior facilidade, como por exemplo as impedâncias das linhas de transmissão que dependem principalmente do material de que são constituídas e de seu comprimento. Estes elementos não apresentam um grande grau de imprecisão em comparação com os valores das potências nas barras, já que estas podem variar em intervalos de tempo muito pequenos, e ainda estão sujeitas às imprecisões de medição.

Um fluxo de carga *fuzzy* possibilita associar aos valores de injeções de potência ativa e reativa nas barras as respectivas imprecisões, permitindo calcular os respectivos desvios.

Em [11] foi utilizada a função de pertinência sinusoidal no desenvolvimento do fluxo de carga *fuzzy*, tendo sido escolhida devido à facilidade de efetuar cálculos e simplicidade no entendimento dos mesmos. No referido trabalho são apresentados o desenvolvimento e os resultados obtidos para o fluxo de carga linearizado *fuzzy* e para o fluxo de carga Newton *fuzzy*, utilizando-se operadores nebulosos da função sinusoidal para obtenção das distribuições de possibilidades dos ângulos, das magnitudes das tensões (exceto para o fluxo linearizado) e dos fluxos de potência nos ramos.

Com o objetivo de apresentar o desenvolvimento dos fluxos de carga fuzzy sinusoidal (linearizado e newton), apresenta-se a seguir as principais operações nebulosas com a utilização da função de pertinência sinusoidal. E em seguida segue-se com a apresentação do fluxo de carga linearizado *fuzzy* sinusoidal e do fluxo de carga newton *fuzzy* sinusoidal.

3.7.1 Operações com números nebulosos utilizando função de pertinência sinusoidal [11]

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

- adição

$$C(m_C, \alpha_C) = A \oplus B \quad (3.29)$$

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

- subtração

$$D(m_D, \alpha_D) = A \ominus B \quad (3.30)$$

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

- multiplicação

Para a multiplicação tem-se dois métodos de cálculo, referenciados por função faixa larga e função faixa estreita:

a) Função faixa larga

$$E(m_E, \alpha_E) = A \otimes B \quad (3.31)$$

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

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

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

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

b) Função faixa estreita

$$E(m_E, \alpha_E) = A \otimes B \quad (3.32)$$

$$m_E = m_A \cdot m_B \quad \alpha_E = \alpha_{calc}(2)$$

onde $\alpha_{calc}(2)$ é o segundo elemento do vetor:

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

Com essas operações é possível elaborar os modelos dos fluxos de carga nebulosos, efetuando os cálculos a partir de equações baseadas nas equações de fluxo de carga determinísticos.

3.7.2 Fluxo de Carga Linearizado *Fuzzy* Sinusoidal [11]

Com o objetivo de obter estimativas dos fluxos de potência, seja em situações em que eventualmente o fluxo de carga Newton não converge ou quando não há necessidade de resultados precisos em favor de uma maior rapidez na obtenção dos mesmos, o Fluxo de Carga Linearizado (FCL) é um recurso computacional muito útil.

Com o objetivo de chegar ao equacionamento do FCL, são feitas algumas hipóteses simplificadoras:

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

$$\cos(\theta_{km}) \cong 1$$

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

$$taps \cong 1,0 \quad V_k = V_m \cong 1,0pu$$

- Geralmente nas redes de transmissão tem-se:

$$r_{km} \ll x_{km} \quad (r_{km} - \text{resistência série e } x_{km} - \text{reatância série})$$

Assim, tendo em vista as simplificações citadas, o sistema de equações referente às potências nodais pode ser colocado na forma matricial:

$$\underline{P} = B' \cdot \underline{\theta} \quad (3.33)$$

em que:

$\underline{\theta}$ - vetor dos ângulos de fase das tensões nodais (dimensão [NB x 1])

\underline{P} - vetor das injeções nodais líquidas de potência ativa (dimensão [NB x 1])

B' - matriz do tipo admitância nodal (dimensão [NB x NB]) cujos elementos são:

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

onde Ω_k é o conjunto das barras vizinhas a k .

A resolução do sistema é dada por:

$$\underline{\theta} = X \cdot \underline{P} \quad (3.34)$$

onde $X = B'^{-1}$

E o fluxo de potência ativa em uma linha é obtido por:

$$P_{km} = \frac{1}{x_{km}} \cdot \theta_{km} \quad (3.35)$$

É possível, de forma aproximada, inserir as perdas de potência ativa na transmissão através de:

$$P_{km}^{perdas} = g_{km} \cdot \theta_{km}^2 \quad (3.36)$$

Sendo P_{km}^{perdas} as perdas de potência ativa no ramo, g_{km} a condutância série e $\theta_{km} = (\theta_k - \theta_m)$ obtido da primeira estimativa através da equação (3.34).

Adiciona-se metade dos valores das perdas nas respectivas injeções de potência ativa das barras terminais, obtendo-se um novo P , o qual é inserido na equação (3.34) e assim tem-se uma estimativa dos ângulos nodais e também dos fluxos, incluindo-se as perdas de potência ativa na transmissão.

Para simular o fluxo de carga linearizado *fuzzy* sinusoidal (FCLFS), tem-se o seguinte algoritmo:

- a partir dos dados da rede formar a matriz B' do FCL;
- resolver $\tilde{\theta} = B'^{-1} \otimes \tilde{P}$
- calcular $\tilde{P}_{km}^{Perdas} = g_{km} \otimes \tilde{\theta}_{km}^2$
- adicionar às injeções de potência ativa metade das perdas das respectivas barras terminais
- recalculer $\tilde{\theta} = B'^{-1} \otimes \tilde{P}$
- calcular os fluxos nos ramos $\tilde{P}_{km} = \frac{1}{x_{km}} \otimes (\tilde{\theta}_k \ominus \tilde{\theta}_m)$
- calcular a injeção de potência ativa na barra de referência: $\tilde{P}_k = x_{km}^{-1} \otimes \tilde{\theta}_{km}$

Com esse algoritmo obtém-se todos os resultados na forma nebulosa.

3.7.3 Fluxo de Carga Newton *Fuzzy* Sinusoidal [11]

O Fluxo de Carga Newton Fuzzy Sinusoidal (FCNFS) foi desenvolvido visando obter uma distribuição de possibilidades para os resultados.

Inicialmente é executado um Fluxo de Carga Newton com os valores centrais das distribuições dos dados fornecidos para o sistema (valores de m), obtendo-se \underline{V}_d e $\underline{\theta}_d$, que correspondem aos valores de maior grau de pertinência para formar as distribuições de possibilidades para as magnitudes e os ângulos nas tensões nodais, ou seja, são os respectivos valores de m.

Os desvios para \underline{V}_d e $\underline{\theta}_d$ são obtidos multiplicando-se a matriz Jacobiana obtida na última iteração pelos valores dos desvios (α_{Pliq} e α_{Qliq}) das injeções líquidas das potências de entrada, os quais são obtidos a partir dos desvios fornecidos para as potências ativas e reativas das barras no banco de dados.

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

$$\underline{\alpha}_{(\theta,V)} = [J_{final}]^{-1} \cdot \underline{\alpha}_{liqPQ} \quad (3.37)$$

onde

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

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

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

Obtidos os valores dos ângulos e das magnitudes das tensões nas barras na forma nebulosa, pode-se calcular os fluxos nos ramos, as perdas e as potências reativas geradas nas barras de referência e PV e a potência ativa gerada na barra de referência.

Os cálculos dos fluxos de potência nos ramos são executados utilizando-se as mesmas estruturas das expressões do FCN, porém utilizando-se \tilde{V} e $\tilde{\theta}$ (forma nebulosa), lembrando que as operações são executadas utilizando-se os operadores nebulosos.

$$\begin{aligned}
\tilde{P}_{km} &= \tilde{V}_k^2 \underline{\otimes} g_{km} \ominus \tilde{V}_k \underline{\otimes} \text{tap}_{km} \underline{\otimes} \tilde{V}_m \underline{\otimes} (g_{km} \underline{\otimes} \cos(\tilde{\theta}_{km}) \oplus b_{km} \underline{\otimes} \text{sen}(\tilde{\theta}_{km})) \\
\tilde{P}_{mk} &= \tilde{V}_m^2 \underline{\otimes} g_{km} \underline{\otimes} \text{tap}_{km}^2 \ominus \text{tap}_{km} \tilde{V}_k \underline{\otimes} \tilde{V}_m \underline{\otimes} (g_{km} \underline{\otimes} \cos(\tilde{\theta}_{km}) \ominus b_{km} \underline{\otimes} \text{sen}(\tilde{\theta}_{km})) \\
\tilde{Q}_{km} &= \tilde{V}_k^2 \underline{\otimes} (b_{km} \oplus b_{km}^{sh}) \ominus \text{tap}_{km} \underline{\otimes} \tilde{V}_k \underline{\otimes} \tilde{V}_m \underline{\otimes} (g_{km} \underline{\otimes} \text{sen}(\tilde{\theta}_{km}) \ominus b_{km} \underline{\otimes} \cos(\tilde{\theta}_{km})) \\
\tilde{Q}_{mk} &= \tilde{V}_m^2 \underline{\otimes} (b_{km} \oplus b_{km}^{sh}) \underline{\otimes} \text{tap}_{km}^2 \ominus \text{tap}_{km} \text{uline} \tilde{V}_k \underline{\otimes} \tilde{V}_m \underline{\otimes} (g_{km} \underline{\otimes} \text{sen}(\tilde{\theta}_{km}) \ominus b_{km} \underline{\otimes} \cos(\tilde{\theta}_{km}))
\end{aligned}
\tag{3.38}$$

Capítulo 4

Metodologias Propostas para Classificação de Contingências

Este capítulo apresenta as metodologias propostas para a seleção de contingências, que são baseadas no uso do fator de severidade da contingência, que foi desenvolvido com a aplicação de regras nebulosas no fluxo de potência ativa do ramo a sair de operação e no carregamento da vizinhança deste mesmo ramo.

4.1 Introdução

Após uma contingência, o fluxo de potência do ramo contingenciado é redistribuído entre os demais ramos da rede elétrica, ocasionando mudanças em seus fluxos de potência de acordo com as características da rede, sendo que os fluxos que sofrem maiores variações são aqueles eletricamente próximos do ramo que saiu de operação [21].

Considerando que um ramo com fluxo de potência ativa P_{ij} sofre uma contingência, a máxima variação de fluxo nos outros ramos da rede (ΔP_{kl}) será igual a P_{ij} . E quando são consideradas somente as linhas da primeira vizinhança, tem-se:

$$\sum_k \Delta P_{ik} = \sum_l \Delta P_{jl} = P_{ij} \quad (4.1)$$

onde

- ΔP_{ik} são as alterações nos fluxos de potência ativa nos ramos conectados ao nó i ;
- ΔP_{jl} são as alterações nos fluxos de potência ativa nos ramos conectados ao nó j ;
- P_{ij} é o fluxo de potência ativa no ramo contingenciado.

Assim, conclui-se que a somatória das variações (aumentos ou diminuições) dos fluxos nas linhas conectadas aos nós i e j (primeira vizinhança) é limitada pelo valor do fluxo pré-contingência do ramo contingenciado.

E assim, verifica-se que quanto maior o fluxo do ramo contingenciado maior a possibilidade de ocorrência de sobrecargas, visto que este fluxo deverá ser redistribuído entre os demais do sistema, e portanto, o valor do fluxo pré-contingência do ramo contingenciado pode ser levado em consideração na avaliação de possibilidade de sobrecargas nos ramos após a contingência.

Em [2] um dos fatores analisados para avaliar a possibilidade de sobrecarga são os sentidos dos fluxos de potência nos ramos vizinhos ao ramo que sofrerá a contingência, como ilustrado na figura 4.1 com 4 configurações diferentes. Com a saída de operação do ramo 4, constata-se na configuração (a) uma tendência em diminuir os fluxos em todos os ramos, a menos que ocorra uma inversão no sentido dos fluxos. E nas demais configurações, caso os sentidos dos fluxos sejam conservados, ocorrerá ao menos um aumento nos fluxos dos ramos vizinhos [2].

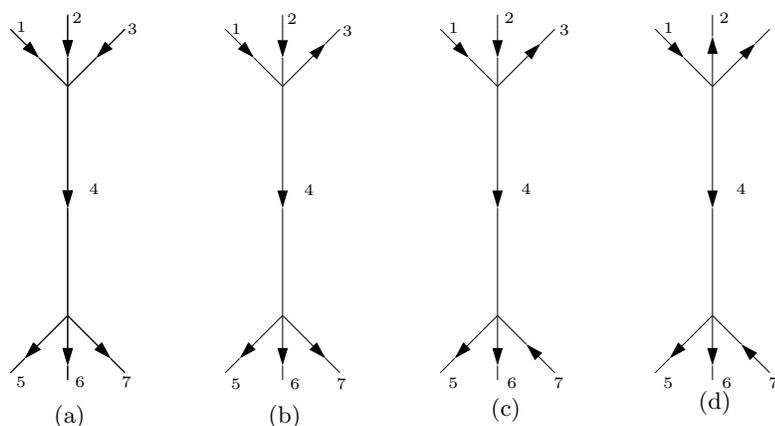


Figura 4.1: Configurações possíveis para contingência

A metodologia apresentada em [2] consiste em obter um valor que representa a capacidade da vizinhança baseado nos limites dos fluxos em cada ramo e nos conceitos analisados através da figura 4.1. Após isso, são associados graus de pertinência relativos a conjuntos nebulosos tanto para a capacidade da vizinhança quanto para os fluxos de potência ativa pré-contingência de todos os ramos, que viabiliza a aplicação de regras nebulosas para a obtenção de um fator de correção a ser multiplicado pelo valor do IP_2 , com o objetivo de minimizar o mascaramento.

Várias tentativas foram feitas ao longo do desenvolvimento desse trabalho para reproduzir essa técnica, no entanto, os resultados obtidos não foram satisfatórios. Os fatores de correção obtidos com a utilização dessa técnica para aplicação em IP_2 não melhoravam a classificação e em muitos casos até mesmo agravavam o mascaramento. A justificativa para esse problema é baseada no fato de que o método preocupa-se com a possibilidade de sobrecargas apenas na primeira vizinhança, o que em sistemas de pequeno porte é mais comum, mas para sistemas maiores não se pode fazer essa afirmação.

Outro ponto importante é que mesmo quando a sobrecarga da contingência ocorre na primeira vizinhança, a definição da capacidade da vizinhança não pode ser baseada nas folgas dos ramos vizinhos ao ramo que saiu de operação. Exemplificando, considera-se a

seguinte situação: ocorre a saída do ramo L_1 que tem como ramos vizinhos L_2 e L_3 , e assim a capacidade da vizinhança é função das folgas destes ramos. Supondo que o ramo L_2 possui uma capacidade baixa e o ramo L_3 uma capacidade alta, a dificuldade é qual dos ramos escolher para definir a capacidade da vizinhança, pois apenas com essas informações não é possível definir se a maior parte do fluxo do ramo L_1 passará por L_2 , não havendo sobrecarga em nenhum dos ramos, ou por L_3 resultando em sobrecarga, pois isto depende dos valores das impedâncias dos demais ramos.

Assim, optou-se por um método alternativo para a representação da capacidade da vizinhança, definindo-a como o maior valor, entre os ramos das vizinhanças, da relação de fluxo pós-contingência com o respectivo limite de potência ativa do ramo:

$$P_V = \max \left(\frac{P_{ij}}{P_{ij}^{max}} \right) \quad (4.2)$$

Caso esse valor seja maior que 1 sabe-se que haverá sobrecarga em pelo menos um ramo da rede. Os valores de fluxo pós-contingência podem ser aproveitados do processo de cálculo do índice de performance, quando o intuito, como em [2], é obter um fator de correção para ser aplicado em IP_2 .

A busca pelo valor que representa o carregamento da vizinhança deve ser efetuada nos ramos com maior possibilidade de sobrecarga, e deve, para o bom desempenho do método, encontrar a maior relação $\frac{P_{ij}}{P_{ij}^{max}}$ dentre todos os ramos. Como já mencionado e discutido, os ramos com maiores variações de fluxo são aqueles eletricamente próximos ao ramo contingenciado, podendo restringir o processo de busca do carregamento da vizinhança às áreas adjacentes a contingência, sendo que a extensão dessa área (número de vizinhanças) é definida em função da rede estudada e do carregamento da mesma.

O estado pós-contingência pode ser obtido tanto pelo modelo não-linear para a rede quanto pelo modelo linear, visto que são necessários somente os valores de fluxo de potência ativa dos ramos. Uma técnica que merece destaque é o uso de fatores de distribuição [21], que dependem das reatâncias dos ramos, e podem ser calculados apenas uma vez e armazenados, necessitando de atualização quando ocorrer alguma mudança na topologia do sistema. A equação (4.3) apresenta o cálculo do fluxo de potência ativa para o ramo (k-m) com a saída do ramo (i-j).

$$P_{km} = P_{km}^o + d_{km,ij} \cdot P_{ij}^o \quad (4.3)$$

onde,

- P_{km} é o fluxo pós-contingência do ramo (k - m),
- P_{km}^o é o fluxo pré-contingência deste mesmo ramo,
- $d_{km,ij}$ é o fator de distribuição do ramo (i - j) em relação ao ramo (k - m) e
- P_{i-j} é o fluxo pré-contingência do ramo (i - j).

O fator de distribuição ($d_{km,ij}$) é calculado por [21]:

$$d_{km,ij} = \frac{x_{ij}}{x_{km}} \frac{X_{ki} - X_{kj} - X_{mi} + X_{mj}}{x_{ij} - X_{ii} - X_{jj} + 2X_{ij}} \quad (4.4)$$

onde,

- x_{ij} corresponde à reatância do ramo $(i - j)$;
- x_{km} corresponde à reatância do ramo $(k - m)$;
- X é a inversa da matriz B' .

Com a aplicação de fatores de distribuição, os resultados são obtidos de maneira muito rápida, uma vez que os fluxos de potência ativa pós-contingência são obtidos pela soma do vetor dos fluxos de potência ativa pré-contingência com o vetor resultante da multiplicação dos fatores de distribuição pelo valor do fluxo pré-contingência do ramo que saiu de operação.

Entretanto, como o objetivo desta pesquisa não é apresentar as diferenças computacionais entre os métodos utilizados para obtenção do estado pós-contingência, obteve-se o estado pós-contingência com a utilização do método desacoplado rápido [30].

4.2 Aplicação de lógica nebulosa ao problema

Como já descrito neste capítulo, os valores de carregamento da vizinhança e do fluxo no ramo contingenciado, juntos, podem indicar sobrecargas no sistema, e portanto, esses valores podem ser utilizados na obtenção de um fator de severidade da contingência.

A técnica utilizada na obtenção do fator de severidade da contingência é a lógica nebulosa, que permite a manipulação das informações com o uso de variáveis linguísticas e regras nebulosas. Assim as entradas do sistema são o carregamento da vizinhança (P_V) e o fluxo do ramo contingenciado (P_{ij}), e a saída é o fator de severidade da contingência (λ), que pode ser utilizado para minimizar o mascaramento da classificação por IP_2 ou ser utilizado diretamente como um índice para a classificação de contingências. A seguir são descritas as etapas do sistema de inferência nebuloso utilizado.

- Fuzificação

Os valores do fluxo do ramo contingenciado (P_{ij}) e do carregamento da vizinhança (P_V) são classificados através de graus de pertinência em 5 conjuntos nebulosos: Muito Alto (MA), Alto (A), Normal (N), Baixo (B) e Muito Baixo (MB), conforme ilustra a figura 4.2 para o carregamento da vizinhança e a figura 4.3 para o fluxo do ramo contingenciado.

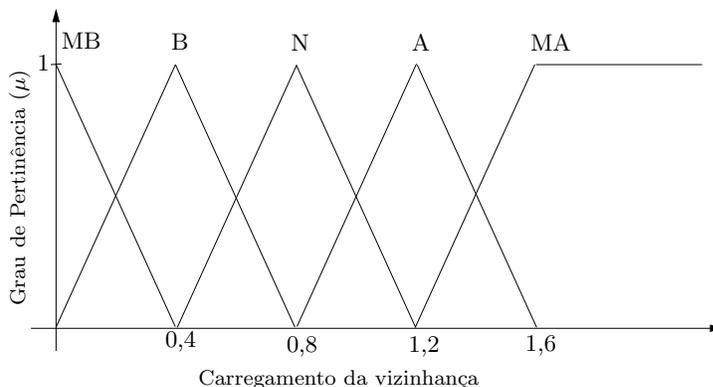


Figura 4.2: Função de fuzificação para capacidade da vizinhança

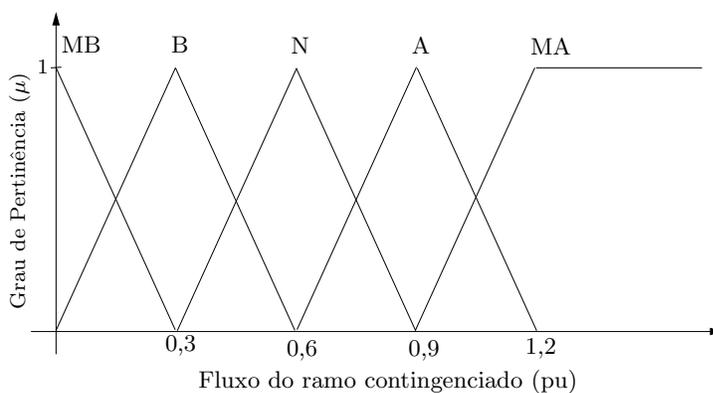


Figura 4.3: Função de fuzificação para capacidade do ramo contingenciado

O domínio desses conjuntos pode variar dependendo do sistema que se está trabalhando, pois em sistemas em que as sobrecargas ultrapassem 60% do limite do ramo, pode ser necessário outro ajuste, pois pode ser que uma sobrecarga de 160% e uma outra de 180% serão classificadas com o mesmo grau de pertinência para o conjunto do muito baixo do carregamento da vizinhança, podendo ocasionar erros na classificação da severidade das contingências.

A saída deste modelo é o fator de severidade (λ), que é classificado nos conjuntos nebulosos (MB, B, N, A e MA), conforme figura 4.4.

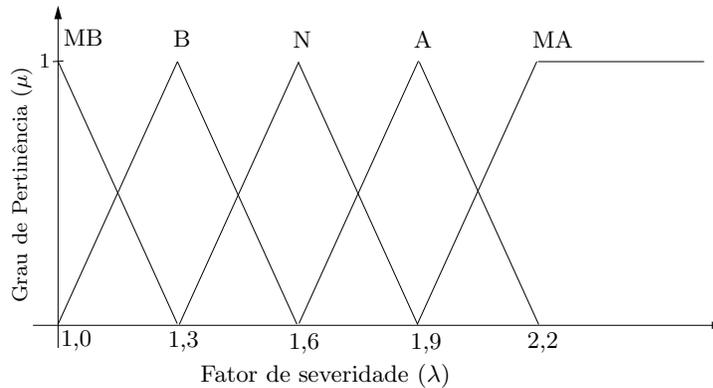


Figura 4.4: Conjuntos nebulosos para o fator de severidade

- Regras nebulosas

Foi aplicado um conjunto de 25 regras ao problema, sendo que os antecedentes das regras são o fluxo do ramo contingenciado e o carregamento de sua vizinhança, enquanto o conseqüente é o conjunto do fator de severidade. As regras utilizadas no sistema de inferência são:

1. SE P_{ij} é muito alta e P_V é muito alto ENTÃO λ é muito alto
2. SE P_{ij} é muito alta e P_V é alto ENTÃO λ é alto
3. SE P_{ij} é muito alta e P_V é normal ENTÃO λ é normal
4. SE P_{ij} é muito alta e P_V é baixo ENTÃO λ é baixo
5. SE P_{ij} é muito alta e P_V é muito baixo ENTÃO λ é baixo
6. SE P_{ij} é alta e P_V é muito alto ENTÃO λ é muito alto
7. SE P_{ij} é alta e P_V é alto ENTÃO λ é alto
8. SE P_{ij} é alta e P_V é normal ENTÃO λ é normal
9. SE P_{ij} é alta e P_V é baixo ENTÃO λ é baixo
10. SE P_{ij} é alta e P_V é muito baixo ENTÃO λ é baixo
11. SE P_{ij} é normal e P_V é muito alto ENTÃO λ é alto
12. SE P_{ij} é normal e P_V é alto ENTÃO λ é alto
13. SE P_{ij} é normal e P_V é normal ENTÃO λ é normal
14. SE P_{ij} é normal e P_V é baixo ENTÃO λ é baixo
15. SE P_{ij} é normal e P_V é muito baixo ENTÃO λ é muito baixo
16. SE P_{ij} é baixa e P_V é muito alto ENTÃO λ é alto

17. SE P_{ij} é baixa e P_V é alto ENTÃO λ é alto
18. SE P_{ij} é baixa e P_V é normal ENTÃO λ é baixo
19. SE P_{ij} é baixa e P_V é baixo e ENTÃO λ é muito baixo
20. SE P_{ij} é baixa e P_V é muito baixo ENTÃO λ é muito baixo
21. SE P_{ij} é muito baixa e P_V é muito alto ENTÃO λ é alto
22. SE P_{ij} é muito baixa e P_V é alto ENTÃO λ é normal
23. SE P_{ij} é muito baixa e P_V é normal ENTÃO λ é baixo
24. SE P_{ij} é muito baixa e P_V é baixo ENTÃO λ é muito baixo
25. SE P_{ij} é muito baixa e P_V é muito baixo ENTÃO λ é muito baixo

As regras nebulosas são utilizadas no sentido de que quanto maior o fluxo no ramo contingenciado e quanto maior o carregamento da vizinhança, maior será o fator de severidade.

- Modelo Linguístico

O modelo lingüístico utilizado como inferência foi o modelo de Mamdani [36], sendo que a escolha deste modelo baseou-se no fato de que o modelo de Takagi-Sugeno-Kang tem maior aplicabilidade em sistemas em que é necessário decompô-los em sistemas menores; o modelo de Tsukamoto não apresentou bons resultados, e o modelo de Larsen não apresentou diferenças significativas.

- Defuzificação

O método de defuzificação utilizado foi o método do centro de área, pois este método considera a forma total do conjunto de saída. Após a defuzificação é então encontrado o fator de severidade (λ), o qual pode ser utilizado de duas maneiras: aplicando-o ao IP_2 ou utilizando-o ele diretamente como um índice para a classificação de contingências, conforme é descrito a seguir.

4.2.1 Aplicação do fator de severidade ao IP_2

Seguindo a proposta apresentada em [2], multiplica-se o fator de severidade pelo índice de performance com expoente 2 (IP_2) calculado para a contingência, resultando no índice de performance modificado ($IP'_2 = \lambda \cdot IP_2$). Essa rotina é executada para todas as contingências, as quais são classificadas utilizando o novo índice IP'_2 .

Sintetizando o processo de seleção de contingências utilizando esta metodologia, apresenta-se o fluxograma da figura 4.5.

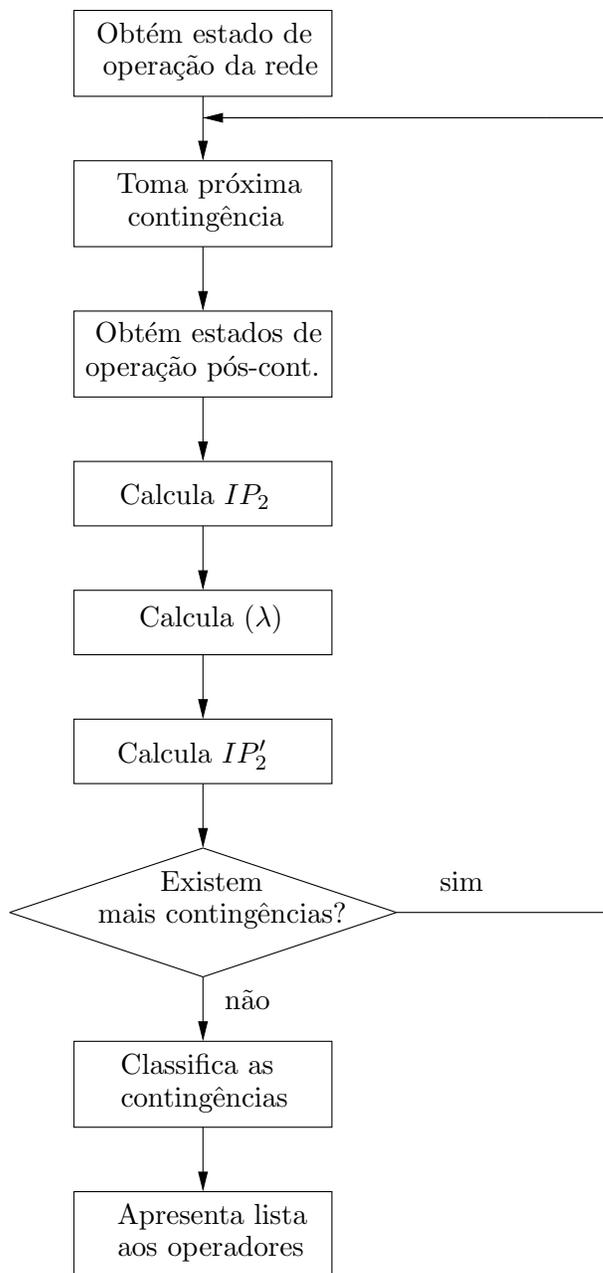


Figura 4.5: Fluxograma para seleção de contingências utilizando IP'_2

4.2.2 Índice nebuloso para classificação de contingências

O fator de severidade, obtido com a lógica nebulosa, é um escalar e reflete o quanto a contingência é severa, e assim pode ser utilizado como um índice para a classificação de contingências, assim como os índices de performance. Como a obtenção deste índice é baseada em lógica nebulosa, atribuiu-se a ele a denominação de índice nebuloso ou índice *fuzzy* (IF). O respectivo fluxograma é apresentado na figura 4.6.

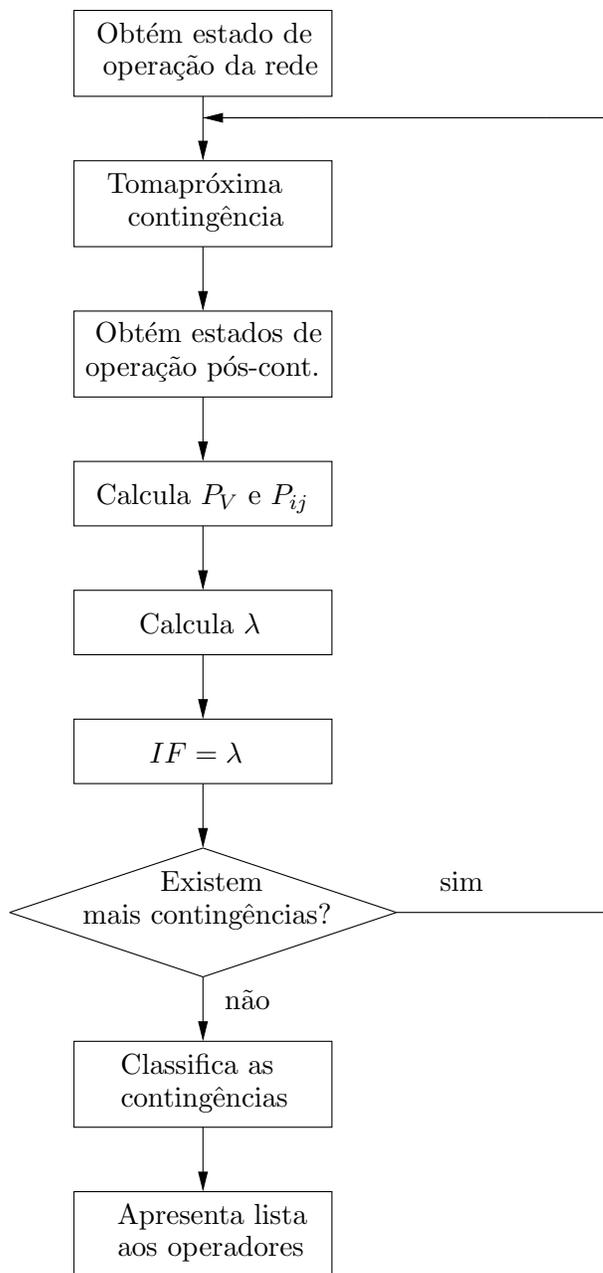


Figura 4.6: Fluxograma para seleção de contingências utilizando IF

4.3 Fluxo de Carga *Fuzzy* (FCF) na Avaliação de Contingências

Como já discutido, o FCF permite considerar as imprecisões associadas ao sistema, e essas imprecisões devem ser consideradas também na análise de contingências, visto que se trata de uma verificação dos limites térmicos das linhas de transmissão. Na etapa de seleção de contingências não é oportuna a utilização do FCF, pois nesta etapa não é necessário que os métodos utilizados para obtenção do fluxo de potência nas linhas apresentem o valor exato, e

em muitos casos é utilizado o fluxo de carga linearizado (DC), em que podem ocorrer variações nos resultados de até 10%. Entretanto, após a etapa de seleção de contingências, é simulado um fluxo de carga completo para as contingências classificadas como mais severas ao sistema, sendo importante observar as possíveis variações de fluxo de potência nas linhas devido às imprecisões do sistema. Assim, com a aplicação do FCF na avaliação das contingências, será possível obter a distribuição de possibilidades para os fluxos de potência nas linhas de transmissão e se proceder a uma avaliação da possibilidade da grandeza considerada violar o seu limite operacional.

Desta forma, propõe-se aqui a utilização de fluxo de carga Newton *fuzzy* sinusoidal [11] na avaliação de contingências, o qual resultará em uma distribuição de possibilidades através de uma função sinusoidal para os valores das grandezas do sistema, permitindo uma melhor análise das mesmas.

Pode-se ter como exemplo o sistema IEEE-30, com um carregamento de 115%. Quando se simula a contingência 37, obtém-se para o fluxo ativo do ramo 38 a distribuição de possibilidades apresentada na figura 4.7.

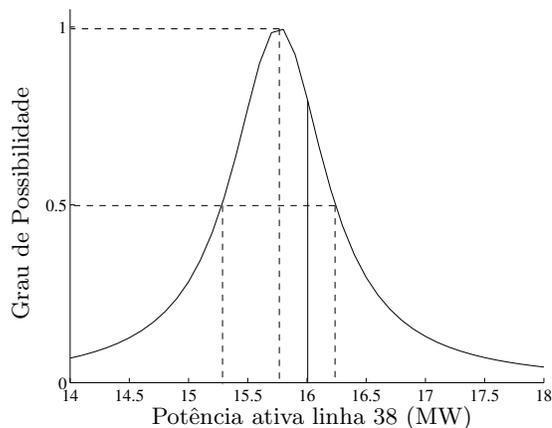


Figura 4.7: Distribuição de possibilidades para o fluxo ativo na linha 38 - rede IEEE-30

O limite de fluxo ativo para este ramo é de 16 MW, como indicado na figura 4.7. Se não forem consideradas as imprecisões do sistema não haverá sobrecarga no ramo 38 mas, considerando as imprecisões, com o FCF pode-se constatar que há uma possibilidade alta de haver sobrecarga na linha. Esta investigação é importante devido à ação dos dispositivos de proteção.

Capítulo 5

Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados da aplicação da metodologia desenvolvida nos sistemas testes do IEEE de 14, 30 e 118 barras [41] e no sistema de 904 barras que corresponde à parte sudoeste do sistema elétrico norte-americano.

Foram simuladas contingências simples, referentes à saída de operação dos ramos do sistema, com exceção dos que resultam emilhamento ou em casos para os quais o fluxo de carga divergia. São apresentados os valores dos índices de performance de ordem 2 e 20 (IP_2 e IP_{20}), além do fator de severidade (λ) e do IP_2 modificado (IP'_2), o que possibilitou comparações da classificação resultante de cada um deles. As simulações foram executadas por meio do programa MatLab©, sendo utilizado a *toolbox* de *fuzzy* para implementar o sistema de inferência proposto.

Para a comparação dos resultados após cada simulação, são apresentados os fatores de correlação ora considerando as contingências que resultaram em sobrecargas, isto é, as contingências críticas, e ora considerando todas as contingências do sistema. As contingências críticas são analisadas separadamente pois a eficiência de um método de seleção de contingências está ligada à capacidade do mesmo em identificar estas contingências. Também são apresentados nos resultados a taxa de captura e o número de alarmes falsos, correspondendo às contingências que são classificadas como severas, e no entanto, não apresentam violações de limites.

5.1 Taxa de captura

A Taxa de Captura (TC) é calculada pelo seguinte procedimento [18]:

- definir o conjunto N das n contingências críticas, com a utilização de IP_{20} ;
- definir o conjunto M com as primeiras n contingências classificadas com a utilização do índice que se deseja avaliar;
- determinar k , o número de contingências do conjunto M que aparece no conjunto N ;
- a taxa de captura é definida pela expressão:

$$TC = \left(\frac{k}{n}\right) \cdot 100\% \quad (5.1)$$

5.2 Vizinhanças consideradas nas simulações

Nas redes do IEEE, a capacidade da vizinhança foi pesquisada nas três primeiras vizinhanças, embora para a rede de 14 barras somente a primeira vizinhança fosse suficiente e para a rede de 30 barras até a segunda vizinhança bastava, mas como para a rede de 118 foi necessária a análise até a terceira vizinhança, optou-se por fazer a pesquisa do máximo carregamento nas três primeiras vizinhanças das redes do IEEE. Já na rede de 904 barras o uso somente das vizinhanças não foi suficiente, tendo sido realizada uma busca em todos os ramos da rede. Para o cálculo dos fluxos pós-contingência necessários para a obtenção do carregamento da vizinhança e de IP_{20} e IP_2 , foi utilizado o método do desacoplado rápido [30].

5.3 Apresentação dos resultados

Primeiramente são apresentados os resultados para o IP_2' e depois os resultados da utilização do índice nebuloso IF .

Os resultados da classificação das contingências pelos índices são apresentados em uma tabela, em que constam as contingências ordenadas pelo IP_{20} , os nós terminais dos ramos, os valores dos índices e a ordem das contingências determinada por cada um deles. Também é apresentada uma segunda tabela com a taxa de captura e fatores de correlação das contingências, sendo que nessas tabelas as variáveis são discriminadas utilizando a seguinte nomenclatura:

- TC: taxa de captura, calculada conforme descrito neste capítulo;
- FC1: fator de correlação entre os valores de IP_{20} e do outro índice a ser avaliado (IP_2 , IP_2' ou IF) considerando somente as contingências que causam sobrecargas, isto é, as classificadas nas primeiras colocações pelo IP_{20} ;
- FC2: fator de correlação entre os valores de ordenação impostos por IP_{20} e pelo índice a ser avaliado (IP_2 , IP_2' ou IF) considerando somente as contingências que causam sobrecargas;
- FC3: fator de correlação entre os valores de IP_{20} e do outro índice a ser avaliado (IP_2 , IP_2' ou IF) para todas as contingências;
- FC4: fator de correlação entre os valores de ordenação impostos por IP_{20} e pelo índice a ser avaliado (IP_2 , IP_2' ou IF) para todas as contingências.

5.4 Resultados com a aplicação de IP'_2

Como já exposto no Capítulo 4, o IP'_2 é uma modificação do IP_2 pela multiplicação do fator de severidade.

5.4.1 Rede IEEE-14

É um sistema teste do IEEE, cujos dados aparacem em [40], sendo composto por 14 barras e 20 ramos. Foi simulada a saída de operação de todos os 20 ramos deste sistema, e 10 dessas contingências resultaram em sobrecargas, que são classificadas como as 10 primeiras pelo IP_{20} . Os resultados estão na tabela 5.1.

Tabela 5.1: IP'_2 para IEEE-14

conting.	de-para	ordem (IP_{20})	ordem (IP_2)	ordem (IP'_2)	IP_{20}	IP_2	IP'_2
1	1 - 2	1	3	3	26,0527.10 ⁷	14,5801	36,8301
3	2 - 3	2	2	1	22,6434.10 ⁷	16,5617	41,2846
10	5 - 6	3	1	2	96,1215.10 ⁴	20,1927	38,3662
7	4 - 5	4	10	5	2721,0784	7,4789	18,1728
2	1 - 5	5	4	4	2311,3027	9,1515	21,8525
4	2 - 4	6	7	6	102,3195	7,8198	16,1367
5	2 - 5	7	19	8	77,0399	6,7490	12,8230
13	6 - 13	8	5	7	5,1715	8,9458	14,9801
9	4 - 9	9	6	9	2,2130	7,8314	12,6575
20	13 - 14	10	12	13	1,6369	7,3945	11,5030
17	9 - 14	11	9	10	0,9771	7,6816	12,1661
6	3 - 4	12	20	18	0,8956	6,1897	9,8645
12	6 - 12	13	11	12	0,6415	7,4406	11,5423
11	6 - 11	14	8	11	0,3976	7,7055	11,9014
18	10 - 11	15	13	14	0,3201	7,1894	10,7196
19	12 - 13	16	16	20	0,2895	6,9269	8,9926
14	7 - 8	17	17	19	0,2692	6,8260	9,6164
16	9 - 10	18	14	16	0,2638	6,9733	10,5310
15	7 - 9	19	15	15	0,2315	6,9401	10,5529
8	4 - 7	20	18	17	0,2161	6,8139	10,2950

Como pode-se observar, IP'_2 apresentou uma classificação mais próxima da obtida por IP_{20} . Na classificação dada por IP_2 ocorreram 2 alarmes falsos (contingências 17 e 11), enquanto que IP'_2 resultou em somente um alarme falso (contingência 17).

Mesmo com a utilização de IP'_2 ainda podem ser identificados casos de mascaramento, como é o caso da contingência 17 que, embora não resulte em sobrecarga, está classificada entre as 10 primeiras contingências, na 10^a posição, entretanto, quando a classificação é dada por IP_2 esta contingência é classificada na 9^a posição. Outros exemplos podem ser citados, como as contingências 7, 5 e 20, que embora resultem em violações, na classificação usando

IP_2 não estão classificadas entre as severas, e com a utilização de IP'_2 , a 7 é considerada severa, 5 também é severa e 20 continua como não severa. Assim, a utilização do fator de severidade com o IP_2 , que resulta no IP'_2 , não eliminou o mascaramento, mas diminuiu o número de casos.

Tabela 5.2: Taxa de captura e fatores de correlação para IP'_2 (IEEE-14)

	TC (%)	FC1	FC2	FC3	FC4
IP_2	80	0,5642	0,5338	0,6270	0,7293
IP'_2	90	0,7541	0,9334	0,7676	0,9038

A tabela 5.2 apresenta a taxa de captura e os fatores de correlação. Como pode-se constatar, com o uso de IP'_2 a taxa de captura aumentou em 10%, indicando um número maior de contingências severas foram classificadas entre as 10 primeiras, o que representa uma diminuição no mascaramento, pois quanto menor a taxa de captura diminui o número de contingências menos severas classificadas acima de contingências mais severas.

Os resultados dos fatores de correlação refletem o quanto as classificações obtidas por IP'_2 e IP_2 são similares à classificação obtida por IP_{20} , apesar dos valores da tabela 5.2 demonstram que IP'_2 apresenta resultados mais compatíveis com IP_{20} do que IP_2 , pois como pode ser observado os fatores de correlação para IP'_2 estão mais próximos da unidade do que os fatores de correlação para IP_2 . Dentre os fatores de correlação percebe-se também que o valor mais alto é o fator de correlação de IP'_2 para as contingências severas (FC2), que é exatamente o fator mais importante, pois trata-se da classificação das contingências severas, que são justamente as que necessitam de maior atenção, uma vez que essas irão para a próxima etapa: a avaliação de contingências.

5.4.2 Rede IEEE-30

Este sistema é formado por 30 barras e 41 ramos, cujos dados são apresentados em [41], em que foram assumidos valores de 130, 90, 70, 65, 32 e 16 MW como limites de fluxos de potência ativa conforme [31]. Também foram efetuadas modificações na potência gerada das barras: 2, 5, 8, 11 e 13 sendo mudadas para 80, 15, 10, 10 e 12 MW, respectivamente, e foi imposta uma tensão de 1,05 pu para essas barras, como os dados apresentados em [2]. Dos 41 ramos existentes nessa rede, foi simulada a retirada de 38, dos quais 10 resultaram em contingências severas, classificadas pelo IP_{20} nas primeiras colocações da tabela 5.3, em que são também apresentados os resultados da classificação das contingências utilizando IP_2 e IP'_2 .

Tabela 5.3: IP'_2 para IEEE-30

conting.	de-para	ordem (IP_{20})	ordem (IP_2)	ordem (IP'_2)	IP_{20}	IP_2	IP'_2
1	1 - 2	1	4	2	729,4097	8,9829	20,7976
5	2 - 5	2	2	1	320,2158	10,7095	24,1267
2	1 - 3	3	5	4	282,5395	8,0500	16,7660
4	3 - 4	4	8	6	205,2337	7,9286	15,0643
7	4 - 6	5	7	5	65,4796	7,9549	15,1143
36	28 - 27	6	1	3	35,5134	10,7526	18,6738
10	6 - 8	7	10	8	22,7547	7,3355	12,9287
41	6 - 28	8	12	9	7,9797	7,1783	12,0336
3	2 - 4	9	36	14	2,2489	6,1737	10,1244
6	2 - 6	10	16	11	1,2687	7,0365	11,5500
25	10 - 20	11	9	10	0,4169	7,6701	11,7728
15	4 - 12	12	3	7	0,3499	9,4683	14,5773
9	6 - 7	13	38	24	0,0766	5,8895	8,4954
38	27 - 30	14	15	13	0,0660	7,0647	10,1368
37	27 - 29	15	22	17	0,0585	6,6020	9,3837
24	19 - 20	16	13	16	0,0333	7,1132	9,4558
17	12 - 14	17	20	21	0,0248	6,6244	8,6108
18	12 - 15	18	11	15	0,0232	7,2912	9,5241
19	12 - 16	19	19	20	0,0210	6,6843	8,6891
14	9 - 10	20	6	12	0,0199	8,0373	10,4453
30	15 - 23	21	18	23	0,0197	6,7103	8,5428
22	15 - 18	22	27	30	0,0196	6,4162	8,1702
21	16 - 17	23	28	29	0,0196	6,3561	8,2587
28	10 - 22	24	25	27	0,0193	6,4548	8,3900
27	10 - 21	25	17	19	0,0193	6,7588	8,7854
39	29 - 30	26	29	32	0,0192	6,3309	8,1383
23	18 - 19	27	35	38	0,0189	6,1970	7,5455
32	23 - 24	28	30	37	0,0188	6,3212	7,7603
31	22 - 24	29	24	26	0,0186	6,4715	8,4073
20	14 - 15	30	32	35	0,0185	6,2484	7,9171
8	5 - 7	31	37	33	0,0184	6,0006	8,0950
29	21 - 22	32	31	31	0,0184	6,2660	8,1406
40	8 - 28	33	34	34	0,0183	6,2228	8,0885
33	24 - 25	34	33	36	0,0181	6,2450	7,8078
26	10 - 17	35	26	28	0,0178	6,4244	8,3502
35	25 - 27	36	23	25	0,0178	6,5174	8,4663
12	6 - 10	37	21	22	0,0167	6,6220	8,6062
11	6 - 9	38	14	18	0,0160	7,0723	9,1909

A classificação baseada em IP_2 resultou em 3 alarmes falsos, as contingências 25, 15 e 14 que não resultaram em violações e foram classificadas como contingências severas pois estão entre as 10 primeiras de acordo com IP_2 . Em contrapartida as contingências 41, 3 e 6 que apresentam violações não foram classificadas como severas.

A a classificação baseada em IP'_2 resultou em alarmes falsos com as contingências 25 e 15, enquanto que as contingências 3 e 6 não foram consideradas severas. A tabela 5.4 apresenta as taxas de captura e os fatores de correlação.

Tabela 5.4: Taxa de captura e fatores de correlação para IP'_2 (IEEE-30)

	TC (%)	FC1	FC2	FC3	FC4
IP_2	70	0,3668	0,6943	0,5279	0,6474
IP'_2	80	0,6800	0,8667	0,7494	0,8346

Com base nos valores dos fatores de correlação constata-se que a classificação apresentada por IP'_2 encontra-se muito mais próxima à classificação obtida pelo IP_{20} do que utilizando o IP_2 .

5.4.3 Rede IEEE-118

Este sistema apresenta 118 barras e 186 ramos, cujos dados são apresentados na referência [41] e os limites de potência ativa no Apêndice A. Foi simulada a saída de 165 ramos deste sistema, pois para os demais ramos a saída de operação resulta em ilhamento ou o fluxo de carga não converge. Das contingências simuladas 7 resultaram em sobrecargas. A tabela 5.6 apresenta os resultados para 50 contingências mais severas.

A classificação obtida por IP'_2 apresentou 2 alarmes falsos (contingências 8 e 51), enquanto que IP_2 apresentou 3 (contingências 8, 96 e 51). IP'_2 ainda melhorou a classificação das contingências, como por exemplo, a contingência 164, que por IP_{20} é classificada como 3^a, enquanto que IP_2 a classifica como 20^a e IP'_2 na 10^a posição, sendo que esta situação se repete para uma série de contingências, isto é, apesar IP'_2 não resultar em uma classificação igual à fornecida por IP_{20} apresenta melhor resultado que a classificação obtida por IP_2 . A tabela 5.5 apresenta os fatores de correlação e as taxas de captura.

Tabela 5.5: Taxa de captura e fatores de correlação para IP'_2 (IEEE-118)

	TC (%)	FC1	FC2	FC3	FC4
IP_2	57,1428	0,6054	0,0129	0,3420	0,4447
IP'_2	71,4285	0,8517	0,3169	0,6379	0,6965

Tabela 5.6: IP'_2 para IEEE-118

conting.	de-para	ordem (IP_{20})	ordem (IP_2)	ordem (IP'_2)	IP_{20}	IP_2	IP'_2
38	26 - 30	1	2	1	6546,7643	14,968	37,0592
33	25 - 27	2	5	2	185,8920	14,3179	31,3848
164	100 - 104	3	20	10	14,5986	12,5748	22,3848
167	100 - 106	4	9	7	13,7583	13,0481	24,0395
108	69 - 70	5	11	9	11,6260	12,9754	23,7085
118	76 - 77	6	7	5	6,9881	13,8678	25,1138
36	30 - 17	7	4	4	1,8746	14,3839	25,3876
8	8 - 5	8	1	3	0,9962	16,8170	28,9763
116	69 - 75	9	24	14	0,7899	12,5106	21,6043
96	38 - 65	10	6	8	0,6796	13,9369	23,9512
54	30 - 38	11	38	19	0,4681	12,1634	20,7752
3	4 - 5	12	21	16	0,4325	12,5486	21,3535
51	38 - 37	13	3	6	0,4136	14,5099	24,6775
171	105 - 108	14	92	66	0,3803	11,9877	17,9119
173	108 - 109	15	101	69	0,3666	11,9732	17,8549
120	75 - 77	16	67	49	0,3583	12,0432	18,2693
168	104 - 105	17	83	40	0,3574	12,0125	18,7808
107	68 - 69	18	16	12	0,3358	12,8001	21,7692
119	69 - 77	19	41	20	0,3350	12,1577	20,6771
110	70 - 71	20	143	43	0,3294	11,9267	18,3427
175	109 - 110	21	137	74	0,3260	11,9378	17,6985
117	74 - 75	22	46	32	0,3230	12,1255	19,4786
23	17 - 18	23	22	72	0,3192	12,5474	17,7220
104	65 - 68	24	156	44	0,3181	11,8478	18,3273
94	63 - 64	25	13	11	0,3156	12,9076	21,9525
93	63 - 59	26	14	18	0,3156	12,9076	21,1395
112	71 - 72	27	141	73	0,3122	11,9294	17,7102
181	27 - 115	28	36	56	0,3119	12,2204	18,0762
21	15 - 17	29	25	63	0,3119	12,4580	17,9227
172	106 - 107	30	55	80	0,3091	12,0770	17,3918
43	27 - 32	31	73	67	0,3085	12,0342	17,9053
34	27 - 28	32	32	60	0,3076	12,2656	17,9829
109	24 - 70	33	130	70	0,3024	11,9500	17,8194
125	79 - 80	34	19	15	0,3004	12,5874	21,4079
39	17 - 31	35	79	65	0,2991	12,0236	17,9170
16	11 - 13	36	75	121	0,2989	12,0294	15,6224
35	28 - 29	37	64	64	0,2978	12,0499	17,9225
52	37 - 39	38	151	132	0,2969	11,8911	15,3878
5	5 - 6	39	12	26	0,2968	12,9133	20,0737
10	4 - 11	40	50	37	0,2967	12,0916	18,8528
24	18 - 19	41	72	154	0,2967	12,0356	13,3447
53	37 - 40	42	31	82	0,2958	12,2867	17,2493
26	15 - 19	43	123	144	0,2951	11,9589	14,7199
17	12 - 14	44	144	149	0,2947	11,9227	14,6149
11	5 - 11	45	34	42	0,2942	12,2484	18,3906
136	85 - 89	46	23	22	0,2941	12,5168	20,5906
50	34 - 37	47	18	47	0,2936	12,6062	18,2759
55	39 - 40	48	159	163	0,2935	11,8427	12,9875
56	40 - 41	49	120	155	0,2921	11,9596	13,2806
137	88 - 89	50	28	24	0,2919	12,3885	20,3553

5.4.4 Rede 904 barras

Esta rede corresponde ao sistema elétrico do sudoeste dos EUA, sendo simulada a saída de 955 dos 1283 ramos, com carregamento de 75 % relativo ao seu caso base para diminuir o número de contingências severas. Foram identificadas 86 contingências que resultaram em sobrecargas. Os resultados para as 100 contingências mais severas são apresentados na tabela 5.7.

Tabela 5.7: IP_2' para a rede de 904 barras

conting.	de-para	ordem (IP_{20})	ordem (IP_2)	ordem (IP_2')	IP_{20}	IP_2	IP_2'
552	861 - 884	1	14	1	92,9836.10 ⁷	142,0950	358,8230
153	395 - 582	2	21	19	5550,1700	138,9753	281,6161
817	455 - 456	3	4	5	3562,7738	144,3554	352,8332
820	478 - 492	4	2	3	356,7738	144,3554	352,8332
816	463 - 455	5	1	2	3562,7738	144,3554	352,8332
821	492 - 731	6	5	6	3562,7738	144,3554	352,8332
819	464 - 478	7	3	4	3562,7738	144,3554	352,8332
818	456 - 464	8	6	7	3562,7738	144,3554	352,8332
319	463 - 477	9	7	8	3495,0090	144,3029	352,5256
839	539 - 513	10	10	10	3476,6197	144,2968	352,4574
836	859 - 608	11	9	11	3476,6197	144,2968	352,4574
840	513 - 485	12	13	14	3476,6197	144,2968	352,4574
837	608 - 571	13	11	12	3476,6197	144,2968	352,4574
838	571 - 539	14	8	9	3476,6197	144,2968	352,4574
841	477 - 485	15	12	13	3476,6197	144,2968	352,4574
921	775 - 777	16	28	15	1675,3059	136,9067	327,9291
142	343 - 687	17	70	16	453,1956	135,2115	309,3660
978	721 - 166	18	58	25	423,8436	135,5836	257,6089
1017	678 - 788	19	22	17	178,4934	138,7793	303,1647
191	678 - 856	20	23	18	178,4934	138,7793	303,1647
1099	671 - 622	21	193	21	76,9459	134,0910	276,1348
1098	671 - 622	22	192	20	76,9459	134,0910	276,1348
96	620 - 622	23	48	22	51,6776	135,8677	267,1219
1233	738 - 735	24	221	23	44,4103	133,9495	259,8244
1232	738 - 735	25	220	24	44,4103	133,9495	259,8244
259	405 - 619	26	43	27	20,4588	136,2543	252,7458
785	622 - 619	27	42	26	20,4588	136,2543	252,7458
107	372 - 708	28	104	31	15,5460	134,6594	248,9484
608	116 - 877	29	222	32	14,3100	133,9433	247,1120
609	116 - 877	30	223	33	14,3100	133,9432	247,1117
125	709 - 389	31	139	34	12,4085	134,3791	247,0417
205	419 - 408	32	114	48	10,4038	134,6028	245,2358
807	493 - 523	33	53	36	7,4296	135,5919	245,7939
804	457 - 465	34	56	39	7,4296	135,5919	245,7939
805	465 - 479	35	57	40	7,4296	135,5919	245,7939
809	552 - 834	36	55	38	7,4296	135,5919	245,7939
808	523 - 552	37	52	35	7,4296	135,5919	245,7939
806	479 - 493	38	54	37	7,4296	135,5919	245,7939
672	883 - 785	39	110	49	7,2108	134,6083	244,3996
849	800 - 567	40	63	45	7,1958	135,5819	245,6081
852	512 - 484	41	61	42	7,1958	135,5819	245,6081
850	567 - 536	42	59	41	7,1958	135,5819	245,6081
851	536 - 512	43	60	43	7,1958	135,5819	245,6081
854	475 - 462	44	62	44	7,1958	135,5819	245,6081
853	484 - 475	45	64	46	7,1958	135,5819	245,6081

continua na próxima página

Tabela 5.7: IP'_2 a rede de 904 barras (continuação)

conting.	de-para	ordem (IP_{20})	ordem (IP_2)	ordem (IP'_2)	IP_{20}	IP_2	IP'_2
316	457 - 462	46	65	47	7,1416	135,5723	245,5512
207	668 - 642	47	15	28	4,6571	139,7807	249,4857
848	765 - 642	48	16	29	4,5102	139,7632	249,2286
772	668 - 874	49	17	30	4,4200	139,7568	249,0737
214	708 - 371	50	115	55	4,3899	134,6010	241,8515
307	730 - 893	51	73	57	3,1588	135,1623	241,3260
100	681 - 699	52	49	58	3,0473	135,8671	241,2799
257	687 - 688	53	50	54	2,9442	135,6932	241,8940
1104	776 - 688	54	51	56	2,8825	135,6622	241,7624
680	785 - 823	55	111	73	2,7947	134,6080	239,7999
813	524 - 553	56	76	60	2,7780	135,1572	240,1685
812	834 - 553	57	75	59	2,7780	135,1572	240,1685
318	524 - 494	58	74	61	2,7766	135,1572	240,1660
823	491 - 731	59	72	63	2,7617	135,1640	240,1510
822	494 - 491	60	71	62	2,7617	135,1640	240,1510
42	386 - 708	61	95	68	2,6549	134,8681	239,9012
102	594 - 725	62	147	203	2,0634	134,2872	214,2940
55	724 - 368	63	144	76	2,0460	134,3406	237,9279
56	724 - 643	64	46	67	2,0356	135,9395	239,9241
216	708 - 374	65	29	74	1,9504	136,4190	238,9247
29	777 - 355	66	87	78	1,5566	135,0282	236,3203
826	615 - 591	67	35	64	1,5334	136,2817	239,9755
824	731 - 551	68	36	65	1,5334	136,2817	239,9755
825	551 - 591	69	37	66	1,5334	136,2817	239,9755
82	649 - 383	70	80	75	1,5213	135,0759	237,9552
323	615 - 639	71	38	69	1,5139	136,2677	239,8952
832	664 - 639	72	41	72	1,4991	136,2624	239,8432
831	679 - 664	73	39	70	1,4991	136,2624	239,8432
830	902 - 679	74	40	71	1,4991	136,2624	239,8432
800	629 - 710	75	24	50	1,4884	137,7980	242,4053
799	599 - 629	76	25	51	1,4884	137,7980	242,4053
279	599 - 627	77	26	52	1,4813	137,7953	242,3786
829	879 - 627	78	27	53	1,4812	137,7943	242,3767
152	395 - 413	79	83	191	1,3671	135,0560	217,2579
54	724 - 367	80	69	77	1,3255	135,2876	237,1175
149	398 - 651	81	265	135	1,2931	133,7661	226,7761
22	716 - 715	82	44	81	1,2318	136,1198	236,0326
1043	768 - 95	83	118	212	1,1943	134,5480	212,5469
105	387 - 636	84	94	79	1,0829	134,8726	236,1675
771	788 - 636	85	93	80	1,0829	134,8726	236,1675
215	708 - 369	86	100	82	1,0674	134,7224	235,5500
126	709 - 388	87	249	87	0,8707	133,8103	233,3862
190	788 - 375	88	91	83	0,8291	134,9600	234,8440
95	620 - 404	89	188	176	0,8047	134,1240	219,1658
260	635 - 610	90	146	85	0,8006	134,3221	233,9267
782	786 - 635	91	145	84	0,8006	134,3221	233,9267
294	698 - 691	92	195	109	0,7074	134,0869	231,3997
277	562 - 891	93	159	92	0,6052	134,2167	232,1035
278	561 - 891	94	158	91	0,6052	134,2167	232,1035
794	657 - 897	95	163	96	0,6048	134,2160	232,0997
798	656 - 897	96	164	97	0,6048	134,2160	232,0997
797	630 - 656	97	161	94	0,6048	134,2160	232,0997
793	631 - 657	98	162	95	0,6048	134,2160	232,0997
791	562 - 601	99	166	99	0,6048	134,2160	232,0997

continua na próxima página

Tabela 5.7: IP'_2 a rede de 904 barras (continuação)

conting.	de-para	ordem (IP_{20})	ordem (IP_2)	ordem (IP'_2)	IP_{20}	IP_2	IP'_2
795	561 - 600	100	165	98	0,6048	134,2160	232,0997

Tabela 5.8: Taxa de captura e fatores de correlação para IP'_2 (904 barras)

	TC (%)	FC1	FC2	FC3	FC4
IP_2	75,5813	0,1600	0,1917	0,1723	0,7680
IP'_2	95,3488	0,2392	0,7619	0,1809	0,7576

Com os resultados da tabela 5.8 verifica-se que IP'_2 apresentou uma classificação mais próxima da classificação obtida por IP_{20} para as contingências mais críticas, como pode ser observado nos valores de FC2. Já quando consideradas todas as contingências, IP'_2 não apresenta uma grande vantagem nos resultados, com valor até menor que IP_2 , como pode ser observado nos valores de FC4. A principal vantagem de IP'_2 sobre IP_2 está na taxa de captura, que teve um aumento significativo de 75 para 95%.

5.5 Resultados com aplicação de IF

5.5.1 Rede IEEE-14

Os resultados da aplicação de IF para esta rede são apresentados na tabela 5.9, e as taxas de captura e fatores de correlação na tabela 5.10.

Tabela 5.9: IF para IEEE-14

conting.	de-para	ordem (IP_{20})	ordem (IP_2)	ordem (IF)	IP_{20}	IP_2	IF
1	1 - 2	1	3	1	26,0527.10 ⁷	14,5801	2,5260
3	2 - 3	2	2	2	22,6434.10 ⁷	16,5617	2,4928
10	5 - 6	3	1	6	96,1215.10 ⁵	20,1927	1,9000
7	4 - 5	4	10	3	2721,0784	7,4789	2,4299
2	1 - 5	5	4	4	2311,3027	9,1515	2,3879
4	2 - 4	6	7	5	102,3195	7,8198	2,0636
5	2 - 5	7	19	7	77,0399	6,7490	1,9000
13	6 - 13	8	5	8	5,1715	8,9458	1,6745
9	4 - 9	9	6	9	2,2130	7,8314	1,6162
20	13 - 14	10	12	12	1,6369	7,3945	1,5556
17	9 - 14	11	9	11	0,9771	7,6816	1,5838
6	3 - 4	12	20	10	0,8956	6,1897	1,5937
12	6 - 12	13	11	13	0,6415	7,4406	1,5513
11	6 - 11	14	8	14	0,3976	7,7055	1,5445
18	10 - 11	15	13	18	0,3201	7,1894	1,4910
19	12 - 13	16	16	20	0,2895	6,9269	1,2982
14	7 - 8	17	17	19	0,2692	6,8260	1,4088
16	9 - 10	18	14	17	0,2638	6,9733	1,5102
15	7 - 9	19	15	15	0,2315	6,9401	1,5206
8	4 - 7	20	18	16	0,2161	6,8139	1,5109

Tabela 5.10: Taxa de captura e fatores de correlação para IF (IEEE-14)

	TC (%)	FC1	FC2	FC3	FC4
IP_2	70	0,5642	0,5338	0,6270	0,7293
IF	90	0,6290	0,9226	0,6427	0,9383

A aplicação de IF nessa rede aumentou consideravelmente a taxa de captura, de 70 para 90%, e apresentou uma classificação muito mais próxima à classificação de IP_{20} do que para o IP_2 , como é constatado nos valores de FC2 e FC4, sendo que IF melhorou a classificação não só dos casos críticos como de todos os outros.

Comparando os resultados obtidos com a utilização de IP'_2 com os de IF , percebe-se que não existe grandes diferenças para esta rede, sendo que ambos apresentaram a mesma taxa de captura e fatores de correlação com valores próximos.

5.5.2 Rede IEEE-30

As tabelas 5.12 e 5.11 apresentam respectivamente, os resultados para a aplicação de IF nesta rede, e as taxas de captura e fatores de correlação dos resultados.

Tabela 5.11: Taxa de captura e fatores de correlação para IF (IEEE-30)

	TC (%)	FC1	FC2	FC3	FC4
IP_2	70	0,4009	0,6859	0,5279	0,6474
IF	100	0,9067	0,9636	0,8005	0,8446

Como pode-se observar na tabela 5.12 a classificação obtida por IF para as contingências severas apresenta-se muito próxima da classificação obtida por IP_{20} , e todas as contingências severas ficaram classificadas entre as 10 primeiras.

A classificação dada por IF resultou em um fator de correlação de 0,9636 para as contingências mais críticas e de 0,8446 para todas as contingências, que representam taxas consideravelmente melhores comparadas com as taxas de IP_2 (0,6859 e 0,6474) e até mesmo com IP'_2 (0,8667 e 0,8346).

A taxa de captura para IF é de 100%, isto é, todas as contingências que resultam em sobrecarga foram classificadas como severas. Para esta rede, IF apresentou vantagem na classificação das contingências, que pode ser concluído pelos valores dos fatores de correlação e taxa de captura, a qual com IP'_2 foi de 80%.

Tabela 5.12: IF para IEEE-30

conting.	de-para	ordem (IP_{20})	ordem (IP_2)	ordem (IF)	IP_{20}	IP_2	IF
1	1 - 2	1	4	1	729,4097	8,9829	2,3153
5	2 - 5	2	2	2	320,2158	10,7095	2,2528
2	1 - 3	3	5	3	282,5395	8,0500	2,0827
4	3 - 4	4	8	5	205,2337	7,9286	1,9000
7	4 - 6	5	7	4	65,4796	7,9549	1,9000
36	28 - 27	6	1	7	35,5134	10,7526	1,7367
10	6 - 8	7	10	6	22,7547	7,3355	1,7625
41	6 - 28	8	12	8	7,9797	7,1783	1,6764
3	2 - 4	9	36	10	2,2489	6,1737	1,6399
6	2 - 6	10	16	9	1,2687	7,0365	1,6414
25	10 - 20	11	9	12	0,4169	7,6701	1,5349
15	4 - 12	12	3	11	0,3499	9,4683	1,5396
9	6 - 7	13	38	13	0,0766	5,8895	1,4425
38	27 - 30	14	15	14	0,0660	7,0647	1,4349
37	27 - 29	15	22	15	0,0585	6,6020	1,4213
24	19 - 20	16	13	17	0,0333	7,1132	1,3293
17	12 - 14	17	20	20	0,0248	6,6244	1,2999
18	12 - 15	18	11	18	0,0232	7,2912	1,3063
19	12 - 16	19	19	19	0,0210	6,6843	1,2999
14	9 - 10	20	6	26	0,0199	8,0373	1,2996
30	15 - 23	21	18	34	0,0197	6,7103	1,2731
22	15 - 18	22	27	33	0,0196	6,4162	1,2734
21	16 - 17	23	28	28	0,0196	6,3561	1,2993
28	10 - 22	24	25	23	0,0193	6,4548	1,2998
27	10 - 21	25	17	21	0,0193	6,7588	1,2998
39	29 - 30	26	29	32	0,0192	6,3309	1,2855
23	18 - 19	27	35	38	0,0189	6,1970	1,2176
32	23 - 24	28	30	37	0,0188	6,3212	1,2277
31	22 - 24	29	24	30	0,0186	6,4715	1,2991
20	14 - 15	30	32	35	0,0185	6,2484	1,2671
8	5 - 7	31	37	16	0,0184	6,0006	1,3490
29	21 - 22	32	31	29	0,0184	6,2660	1,2992
40	8 - 28	33	34	22	0,0183	6,2228	1,2998
33	24 - 25	34	33	36	0,0181	6,2450	1,2502
26	10 - 17	35	26	24	0,0178	6,4244	1,2998
35	25 - 27	36	23	31	0,0178	6,5174	1,2990
12	6 - 10	37	21	25	0,0167	6,6220	1,2996
11	6 - 9	38	14	27	0,0160	7,0723	1,2996

5.5.3 Rede IEEE-118

Os resultados para as 50 contingências mais severas são dados na tabela 5.13.

Tabela 5.13: IF para IEEE-118

conting.	de-para	ordem (IP_{20})	ordem (IP_2)	ordem (IF)	IF	IP_2	IP'_2
38	26 - 30	1	2	1	6546,7643	14,8968	2,4877
33	25 - 27	2	5	2	185,8920	14,3179	2,1920
164	100 - 104	3	20	6	14,5986	12,5748	1,7801
167	100 - 106	4	9	3	13,7583	13,0481	1,8424
108	69 - 70	5	11	4	11,6260	12,9754	1,8272
118	76 - 77	6	7	5	6,9881	13,8678	1,8109
36	30 - 17	7	4	7	1,8746	14,3839	1,7650
8	8 - 5	8	1	9	0,9962	16,8170	1,7230
116	69 - 75	9	24	8	0,7899	12,5106	1,7269
96	38 - 65	10	6	10	0,6796	13,9369	1,7185
54	30 - 38	11	38	11	0,4681	12,1634	1,7080
3	4 - 5	12	21	12	0,4325	12,5486	1,7017
51	38 - 37	13	3	16	0,4136	14,5099	1,7007
171	105 - 108	14	92	59	0,3803	11,9877	1,4942
173	108 - 109	15	101	60	0,3666	11,9732	1,4912
120	75 - 77	16	67	50	0,3583	12,0432	1,5170
168	104 - 105	17	83	32	0,3574	12,0125	1,5634
107	68 - 69	18	16	19	0,3358	12,8001	1,7007
119	69 - 77	19	41	14	0,3350	12,1577	1,7007
110	70 - 71	20	143	40	0,3294	11,9267	1,5379
175	109 - 110	21	137	67	0,3260	11,9378	1,4826
117	74 - 75	22	46	28	0,3230	12,1255	1,6064
23	17 - 18	23	22	91	0,3192	12,5474	1,4124
104	65 - 68	24	156	37	0,3181	11,8478	1,5469
94	63 - 64	25	13	15	0,3156	12,9076	1,7007
93	63 - 59	26	14	24	0,3156	12,9076	1,6378
112	71 - 72	27	141	65	0,3122	11,9294	1,4846
181	27 - 115	28	36	70	0,3119	12,2204	1,4792
21	15 - 17	29	25	80	0,3119	12,4580	1,4387
172	106 - 107	30	55	79	0,3091	12,0770	1,4401
43	27 - 32	31	73	63	0,3085	12,0342	1,4879
34	27 - 28	32	32	72	0,3076	12,2656	1,4661
109	24 - 70	33	130	61	0,3024	11,9500	1,4912
125	79 - 80	34	19	18	0,3004	12,5874	1,7007
39	17 - 31	35	79	62	0,2991	12,0236	1,4902
16	11 - 13	36	75	122	0,2989	12,0294	1,2987
35	28 - 29	37	64	64	0,2978	12,0499	1,4874
52	37 - 39	38	151	132	0,2969	11,8911	1,2941
5	5 - 6	39	12	35	0,2968	12,9133	1,5545
10	4 - 11	40	50	34	0,2967	12,0916	1,5592
24	18 - 19	41	72	155	0,2967	12,0356	1,1088
53	37 - 40	42	31	97	0,2958	12,2867	1,4039
26	15 - 19	43	123	144	0,2951	11,9589	1,2309
17	12 - 14	44	144	149	0,2947	11,9227	1,2258
11	5 - 11	45	34	57	0,2942	12,2484	1,5015
136	85 - 89	46	23	22	0,2941	12,5168	1,6450
50	34 - 37	47	18	75	0,2936	12,6062	1,4498
55	39 - 40	48	159	160	0,2935	11,8427	1,0967
56	40 - 41	49	120	153	0,2921	11,9596	1,1105

continua na próxima página

Tabela 5.13: IF para IEEE-118 continuação

conting.	de-para	ordem (IP_{20})	ordem (IP_2)	ordem (IF)	IP_{20}	IP_2	IF
137	88 - 89	50	28	23	0,2919	12,3885	1,6431

As taxas de captura e fatores de correlação são apresentados na tabela 5.14. A taxa de captura obtida para esta rede com o uso de IF foi de 100%, que é consideravelmente melhor que a taxa obtida com o uso de IP_2 e até mesmo por IP_2' . Os fatores de correlação indicam através de $FC2$ e $FC4$ que a classificação entre as contingências críticas para IF é melhor que utilizando IP_2 , mesmo quando consideradas todas as contingências.

Tabela 5.14: Taxa de captura e fatores de correlação para IF (IEEE-118)

	TC (%)	FC1	FC2	FC3	FC4
IP_2	57,14	0,6054	0,0129	0,3420	0,4447
IF	100,00	0,8609	0,7857	0,6842	0,7315

5.5.4 Rede 904 barras

Os resultados para 100 contingências mais severas desta rede são apresentados na tabela 5.15, e as taxas de captura e os fatores de correlação na tabela 5.16.

Tabela 5.15: IF para a rede de 904 barras

conting.	de-para	ordem (IP_{20})	ordem (IP_2)	ordem (IF)	IP_{20}	IP_2	IF
552	861 - 884	1	14	1	92,9836.10 ⁷	142,0950	2,5252
153	395 - 582	2	21	21	5550,1700	138,9753	2,0264
817	455 - 456	3	4	2	3562,7738	144,3554	2,4442
820	478 - 492	4	2	4	3562,7738	144,3554	2,4442
816	463 - 455	5	1	3	3562,7738	144,3554	2,4442
821	492 - 731	6	5	5	3562,7738	144,3554	2,4442
819	464 - 478	7	3	6	3562,7738	144,3554	2,4442
818	456 - 464	8	6	7	3562,7738	144,3554	2,4442
319	463 - 477	9	7	8	3495,0090	144,3029	2,4430
839	539 - 513	10	10	9	3476,6197	144,2968	2,4426
836	859 - 608	11	9	10	3476,6197	144,2968	2,4426
840	513 - 485	12	13	11	3476,6197	144,2968	2,4426
837	608 - 571	13	11	12	3476,6197	144,2968	2,4426
838	571 - 539	14	8	14	3476,6197	144,2968	2,4426
841	477 - 485	15	12	13	3476,6197	144,2968	2,4426
921	775 - 777	16	28	15	1675,3059	136,9067	2,3953
142	343 - 687	17	70	16	453,1956	135,2115	2,2880
978	721 - 166	18	58	25	423,8436	135,5836	1,9000
1017	678 - 788	19	22	17	178,4934	138,7793	2,1845
191	678 - 856	20	23	18	178,4934	138,7793	2,1845
1099	671 - 622	21	193	20	76,9459	134,0910	2,0593
1098	671 - 622	22	192	19	76,9459	134,0910	2,0593
96	620 - 622	23	48	22	51,6776	135,8677	1,9660
1233	738 - 735	24	221	23	44,4103	133,9495	1,9397

continua na próxima página

Tabela 5.15: IF para a rede de 904 barras (continuação)

conting.	de-para	ordem (IP_{20})	ordem (IP_2)	ordem (IF)	IP_{20}	IP_2	IF
1232	738 - 735	25	220	24	44,4103	133,9495	1,9397
259	405 - 619	26	43	26	20,4588	136,2543	1,8550
785	622 - 619	27	42	27	20,4588	136,2543	1,8550
107	372 - 708	28	104	28	15,5460	134,6594	1,8487
608	116 - 877	29	222	30	14,3100	133,9433	1,8449
609	116 - 877	30	223	29	14,3100	133,9432	1,8449
125	709 - 389	31	139	31	12,4085	134,3791	1,8384
205	419 - 408	32	114	32	10,4038	134,6028	1,8219
807	493 - 523	33	53	34	7,4296	135,5919	1,8127
804	457 - 465	34	56	35	7,4296	135,5919	1,8127
805	465 - 479	35	57	36	7,4296	135,5919	1,8127
809	552 - 834	36	55	37	7,4296	135,5919	1,8127
808	523 - 552	37	52	39	7,4296	135,5919	1,8127
806	479 - 493	38	54	38	7,4296	135,5919	1,8127
672	883 - 785	39	110	33	7,2108	134,6083	1,8156
849	800 - 567	40	63	40	7,1958	135,5819	1,8115
852	512 - 484	41	61	41	7,1958	135,5819	1,8115
850	567 - 536	42	59	42	7,1958	135,5819	1,8115
851	536 - 512	43	60	43	7,1958	135,5819	1,8115
854	475 - 462	44	62	44	7,1958	135,5819	1,8115
853	484 - 475	45	64	45	7,1958	135,5819	1,8115
316	457 - 462	46	65	46	7,1416	135,5723	1,8112
207	668 - 642	47	15	49	4,6571	139,7807	1,7848
848	765 - 642	48	16	50	4,5102	139,7632	1,7832
772	668 - 874	49	17	52	4,4200	139,7568	1,7822
214	708 - 371	50	115	47	4,3899	134,6010	1,7968
307	730 - 893	51	73	48	3,1588	135,1623	1,7855
100	681 - 699	52	49	61	3,0473	135,8671	1,7759
257	687 - 688	53	50	51	2,9442	135,6932	1,7827
1104	776 - 688	54	51	53	2,8825	135,6622	1,7821
680	785 - 823	55	111	54	2,7947	134,6080	1,7815
813	524 - 553	56	76	56	2,7780	135,1572	1,7770
812	834 - 553	57	75	57	2,7780	135,1572	1,7770
318	524 - 494	58	74	58	2,7766	135,1572	1,7769
823	491 - 731	59	72	59	2,7617	135,1640	1,7767
822	494 - 491	60	71	60	2,7617	135,1640	1,7767
42	386 - 708	61	95	55	2,6549	134,8681	1,7788
102	594 - 725	62	147	206	2,0634	134,2872	1,5958
55	724 - 368	63	144	62	2,0460	134,3406	1,7711
56	724 - 643	64	46	63	2,0356	135,9395	1,7649
216	708 - 374	65	29	77	1,9504	136,4190	1,7514
29	777 - 355	66	87	80	1,5566	135,0282	1,7502
826	615 - 591	67	35	65	1,5334	136,2817	1,7609
824	731 - 551	68	36	66	1,5334	136,2817	1,7609
825	551 - 591	69	37	67	1,5334	136,2817	1,7609
82	649 - 383	70	80	64	1,5213	135,0759	1,7616
323	615 - 639	71	38	68	1,5139	136,2677	1,7605
832	664 - 639	72	41	69	1,4991	136,2624	1,7602
831	679 - 664	73	39	70	1,4991	136,2624	1,7602
830	902 - 679	74	40	71	1,4991	136,2624	1,7602
800	629 - 710	75	24	72	1,4884	137,7980	1,7591
799	599 - 629	76	25	73	1,4884	137,7980	1,7591
279	599 - 627	77	26	74	1,4813	137,7953	1,7590
829	879 - 627	78	27	75	1,4812	137,7943	1,7590

continua na próxima página

Tabela 5.15: IF para a rede de 904 barras (continuação)

conting.	de-para	ordem (IP_{20})	ordem (IP_2)	ordem (IF)	IP_{20}	IP_2	IF
152	395 - 413	79	83	196	1,3671	135,0560	1,6087
54	724 - 367	80	69	76	1,3255	135,2876	1,7527
149	398 - 651	81	265	131	1,2931	133,7661	1,6953
22	716 - 715	82	44	86	1,2318	136,1198	1,7340
1043	768 - 95	83	118	218	1,1943	134,5480	1,5797
105	387 - 636	84	94	78	1,0829	134,8726	1,7510
771	788 - 636	85	93	79	1,0829	134,8726	1,7510
215	708 - 369	86	100	81	1,0674	134,7224	1,7484
126	709 - 388	87	249	82	0,8707	133,8103	1,7442
190	788 - 375	88	91	85	0,8291	134,9600	1,7401
95	620 - 404	89	188	176	0,8047	134,1240	1,6341
260	635 - 610	90	146	83	0,8006	134,3221	1,7415
782	786 - 635	91	145	84	0,8006	134,3221	1,7415
294	698 - 691	92	195	99	0,7074	134,0869	1,7257
277	562 - 891	93	159	89	0,6052	134,2167	1,7293
278	561 - 891	94	158	90	0,6052	134,2167	1,7293
794	657 - 897	95	163	91	0,6048	134,2160	1,7293
798	656 - 897	96	164	92	0,6048	134,2160	1,7293
797	630 - 656	97	161	93	0,6048	134,2160	1,7293
793	631 - 657	98	162	94	0,6048	134,2160	1,7293
791	562 - 601	99	166	95	0,6048	134,2160	1,7293
795	561 - 600	100	165	96	0,6048	134,2160	1,7293

Tabela 5.16: Taxa de captura e fatores de correlação para IF (904 barras)

	TC (%)	FC1	FC2	FC3	FC4
IP_2	75,5813	0,1600	0,1917	0,1725	0,7456
IF	95,3488	0,2483	0,7817	0,1779	0,7549

As taxas de captura para IF e para IP_2' são iguais para esta rede, e melhores que com a utilização de IP_2 . Os fatores de correlação indicam através de FC4 que para essa rede o IF classificou tanto as contingências severas quanto as não severas com praticamente a mesma eficiência, e com pouca diferença com a classificação obtida por IP_2' . Mas quando são comparados os fatores de correlação considerando somente as contingências críticas (FC2), a melhora com a utilização de IF é considerável.

Capítulo 6

Considerações Finais

Neste trabalho foi desenvolvida uma análise sobre os índices de performance mencionados na literatura utilizados na análise de contingências para identificação de sobrecargas, e foi possível observar que o IP_2 é mais utilizado devido ao menor esforço computacional em relação ao IP_{20} . Mesmo considerando o aumento da capacidade de processamento das máquinas, a economia de esforço computacional deve ser considerada pois a análise de contingências é um procedimento a ser realizado em tempo real, cujas funções, devem ser realizadas no menor tempo possível.

Foi visto também que o mascaramento resultante da classificação com IP_2 pode fazer com que contingências severas não sejam consideradas na elaboração de estratégias de controle preventivo/corretivo, e caso a contingência venha a ocorrer o sistema poderá operar de forma insegura.

O objetivo inicial desse trabalho era a obtenção de um fator que pudesse minimizar o mascaramento causado pelo IP_2 , denominado fator de severidade. O fator de severidade foi calculado com base na lógica nebulosa, utilizando como variáveis de entrada o maior carregamento pós contingência dos ramos e o fluxo do ramo contingenciado. A utilização desse método mostrou-se eficiente no sentido de minimizar o mascaramento, no entanto, constatou-se que o fator de severidade poderia ser utilizado diretamente para a classificação de contingências, e com isso eliminando a necessidade de calcular o IP_2 .

O fator de severidade é capaz de quantificar a severidade da contingência, e com isso foi proposta a sua utilização como índice para a classificação das contingências, intitulado Índice *Fuzzy* (IF). A aplicação de *IF* apresentou resultados satisfatórios, com taxas de captura altas, reduzindo dessa forma o mascaramento.

Nesse trabalho foram simuladas somente contingências referentes à saída de operação de ramos do sistema, que podem ser linhas de transmissão ou transformadores, entretanto, a metodologia aqui proposta pode ser aplicada também para a saída de geradores ou barras do sistema.

6.1 Desenvolvimento da metodologia

Inicialmente, pretendia-se calcular a capacidade da vizinhança sem a obtenção dos estados pós-contingência, com base nas folgas dos ramos. No entanto, como apresentado no Capítulo 4, não foi possível obter um valor que representasse a possibilidade da contingência resultar em violação do limite de potência ativa do ramo. Sendo assim, optou-se pelo uso da relação fluxo de potência ativa do ramo pelo limite de potência ativa do mesmo para representação da capacidade da vizinhança, pois valores maiores que a unidade denotam a ocorrência de sobrecarga.

6.2 Utilização de lógica nebulosa em sistemas de energia elétrica

Como discutido nesse trabalho, os conjuntos nebulosos permitem representar as imprecisões nos sistemas de potência, através do fluxo de carga *fuzzy*. No processo de análise de contingências é conveniente utilizá-lo na etapa de avaliação da contingência, permitindo ao operador obter uma distribuição de possibilidades para o estado de operação, podendo então avaliar o quanto grandezas próximas ao limite operacional podem violar tais limites.

A principal vantagem de utilizar a lógica nebulosa está no uso de variáveis lingüísticas e de regras nebulosas, pois as variáveis lingüísticas simbolizam os termos da linguagem natural utilizada por especialistas da área, e a aplicação de regras permite uma melhor representação do conhecimento humano, além da utilização de graus de pertinência que propiciam a classificação dos dados em vários conjuntos.

6.3 Análise geral dos resultados

Em geral, tanto IP'_2 quanto IF mostraram-se mais eficientes para as contingências severas, resultando em uma ordenação próxima da obtida pelo IP_{20} , e apresentaram uma melhor ordenação do que o IP_2 . Comparando ambos os métodos observou-se que IF apresentou, em algumas redes, taxas de captura mais altas, comprovando que pode ser utilizado como um índice para classificação de contingências.

Assim, conclui-se que para sistemas de pequeno porte é orientada a utilização do próprio IP_{20} para a classificação de contingências, uma vez que, o esforço computacional requerido para redes desse porte não justifica a utilização de métodos alternativos frente à capacidade atual das máquinas.

6.4 Sugestões para futuros trabalhos

Associada à análise de contingências, a etapa de ações de controle corretivas/ preventivas também possui um papel importante na segurança estática dos sistemas de potência. E a lógica nebulosa pode contribuir nesta área fornecendo ações de controle baseadas nos graus de pertinência de variáveis como: fatores de sensibilidade, margem de controle e custos. A utilização de lógica nebulosa para esse tipo de controle forneceria uma maior facilidade de

definir uma ação de controle baseada nos graus de pertinência das variáveis de entrada para conjuntos, como por exemplo, alto, normal e baixo.

Essas ações de controle podem ser aplicadas não somente na correção de sobrecargas, mas também na correção de valores de tensão do sistema, atuando na geração de potência reativa dos geradores, banco de capacitores e *taps* dos transformadores.

Referências Bibliográficas

- [1] Balu, N., Bertram, T., Bose, A., Brandwajn, V., Caley, G., Curtice, D., Fouad, A., Fink, L., Lauby, M.G., Wollenberg, B.F., Wrubel, J.N., On-Line power system security analysis, *Proceedings of the IEEE*, 80(2), 262-280, 1992.
- [2] Ozdemir, A., Shingh, C., Fuzzy logic based MW contingency ranking against masking problem, *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, 504-509, 2001.
- [3] Schäfer, K.F., Verstege, J.F.; Adaptive procedure for masking effect compensation in contingency selection algorithms, *IEEE Transactions on Power Systems*, 5(2), 539-545, 1990.
- [4] Halpin, T. F., Fischl, R., Fink, R., Analysis of automatic contingency selection algorithms, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 103(5), 938-945, 1984.
- [5] Irisarri, G. D., Sasson, A. M., AM Automatic contingency selection method for on-line security analysis, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 100(4), 1838-1844, 1981.
- [6] Mikolinnas, T. A., Wollenberg, B. F., An advanced contingency selection algorithm, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 100(2), 608-617, 1981.
- [7] Hsu, Y. Y., Kuo, H. C., Fuzzy-set based contingency ranking, *IEEE Transactions on Power Systems*, 7(3), 1189-1196, 1992.
- [8] Zadeh, L. A., Fuzzy sets, *Information and Control*, 8, 338-353, 1965.
- [9] Zadeh, L. A., Fuzzy sets as a basis for a Theory of possibility, *Fuzzy Sets and System*, 1, 3-28, 1978.
- [10] Bansal, R. C., Bibliography on the fuzzy set theory: Applications in Power Systems, *IEEE Transactions on Power Systems*, 18(4), 1291-1299, 2003.
- [11] Lima, M. M. P., Nova concepção para fluxo de carga fuzzy incorporando função de pertinência sinusoidal, *dissertação de mestrado - Unicamp*, 2000.
- [12] Miranda, V., Matos, M. A. A. C., Saraiva, J. T., Fuzzy load flow - new algorithms incorporating uncertain generation and load representation, *Proceeding of the Tenth Power Systems Computation Conference*, Graz, Austria, 621-627, 1990.
- [13] Kenarangui, R., Seifi, A., Fuzzy power flow analysis, *Electric Power Systems Research*, 29, 105-109, 1994.

- [14] Murari, C. A. F., Pereira, M. A., Lima, M. M. P., A new technique to electrical distribution system load flow based on fuzzy sets, *Fuzzy sets based heuristics for optimization*, Editor: J.L. Verdegay, Ed. Physica Verlag, 2003.
- [15] Canôas, A. C. G., Aplicação de lógica nebulosa na análise de redes de energia elétrica, *dissertação de mestrado - Unicamp*, 2003.
- [16] Pereira, M. A., Conjuntos nebulosos e algoritmos genéticos aplicados à restauração de redes de distribuição de energia elétrica, *tese de doutorado - Unicamp*, 2000.
- [17] Monticelli, A., Fluxo de carga em redes de energia elétrica, *Editora Edgard Blücher Ltda*, São Paulo - Brasil, 1983.
- [18] Guerra, A. F., Seleção de contingências para violações de MW em ramos de sistemas elétricos de potência utilizando abordagem multinível adaptativa, *dissertação de mestrado - Unicamp*, 2002.
- [19] Quintela, A. S., Estudo de índices de proximidade ao limite de estabilidade de tensão e aplicação na seleção de contingências, *dissertação de mestrado - Unicamp*, 2002.
- [20] Alsac, O., Stott, B., Monticelli, A.J., Security analysis and optimization, *Proceedings of the IEEE*, 75(12), 1623-1644, 1987.
- [21] Wood, A. J., Wollenberg, B. F., Power generation operation and control, *John Wiley & Sons*, 1996.
- [22] Castro, C. A., Bose, A., Handschin, E., Hoffmann, W., Comparison of different screening techniques for the contingency selection function, *Electrical Power & Energy Systems*, 18(7), 425-430, 1996.
- [23] Schlueter, R. A., Sekerke J. E., Costi A. G., Improved contingency measures for operation and planning applications, *IEEE Transactions on Power Systems*, 4(4), 724-729, 1989.
- [24] Lauby, M.G., Evaluation of a local dc load flow screening method for branch contingency selection of overloads, *IEEE Transactions on Power Systems*, 3(3), 923-928, 1988.
- [25] Brandwajn, V., Efficient bounding method for linear contingency analysis, *IEEE Transactions on Power Systems*, 3(1), 38-43, 1988.
- [26] Brandwajn, V., Lauby, M. G., Complete bounding method for ac contingency screening, *IEEE Transactions on Power Systems*, 4(2), 724-729, 1989.
- [27] Taylor, D.G., A reactive contingency analysis algorithm using MW and MVAR distribution factors, *IEEE Transactions on Power Systems*, 6(1), 349-355, 1991.
- [28] Matos, M. A., Hatziargyriou, N. D., Multicontingency steady state security evaluation using fuzzy clustering techniques, *IEEE Transactions on Power Systems*, 15(1), 177-183, 2000.
- [29] Sidhu, T. S., Cui, L., Contingency screening for steady-state security analysis by using FFT and artificial neural networks, *IEEE Transactions on Power Systems*, 15(1), 421-426, 2000.

- [30] Stott, B., Alsac, O., Fast decoupled load flow, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 93(3), 859-869, 1974.
- [31] Alsac, O., Stott, B., Optimal load flow with steady-state security, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 94, 745-751, 1974.
- [32] Ortega, N. R. S., Massad, E., Aplicação da teoria de conjuntos fuzzy a processos de biomedicina, *tese de doutorado - USP - São Paulo - SP*, 2001.
- [33] Mcneill, D., Freiberger, P., Fuzzy logic: the discovery of a revolutionary computer technology - and how it is changing our world, *Simon & Schuster*, 1993.
- [34] Bell, K. R. W., Daniels, A. R., Dunn, R. W., Modelling of operator heuristics in disptch for security enhancement, *IEEE Transactions on Power Systems*, 14(3), 1107-1113, 1999.
- [35] Pedrycz, W., Gomide, F., An introduction to fuzzy sets: analysis and design, *MIT Press*, 1998.
- [36] Ross T. J., Fuzzy logic with engineering applications, *International Edition - McGraw-Hill*, 1995.
- [37] Mendel, J. M., Fuzzy logic systems for engineering: a tutorial, *Proceedings of the IEEE*, 83(3), 345-377, 1995.
- [38] Lee, C. C., Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller - part I, *IEEE Transactions on systems*, 20(2), 404-418, 1990.
- [39] Lee, C. C., Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller - part II, *IEEE Transactions on systems*, 20(2), 419-435, 1990.
- [40] Freris, L. L., Sasson, A. M., Investigation of load-flow problem, *Proceedings of the IEEE*, 115(10), 1459-1470, 1968.
- [41] <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>

Apêndice A

Limites Térmicos da Rede IEEE-118

Tabela A.1: Limites de fluxo de potência ativa para a rede IEEE-118

de	para	P_{max} (MW)	de	para	P_{max} (MW)
1	2	144,0000	1	3	144,0000
4	5	310,0000	3	5	350,0000
5	6	175,0000	6	7	175,0000
8	9	1550,0000	8	5	9999,0000
9	10	1550,0000	4	11	144,0000
5	11	144,0000	11	12	144,0000
2	12	144,0000	3	12	144,0000
7	12	160,0000	11	13	144,0000
12	14	144,0000	13	15	144,0000
14	15	144,0000	12	16	160,0000
15	17	288,0000	16	17	160,0000
17	18	350,0000	18	19	292,0000
19	20	175,0000	15	19	144,0000
20	21	175,0000	21	22	175,0000
22	23	175,0000	23	24	320,0000
23	25	187,0000	26	25	9999,0000
25	27	374,0000	27	28	175,0000
28	29	175,0000	30	17	9999,0000
8	30	776,0000	26	30	717,0000
17	31	144,0000	29	31	144,0000
23	32	288,0000	31	32	144,0000
27	32	144,0000	15	33	144,0000
19	34	144,0000	35	36	160,0000
35	37	175,0000	33	37	144,0000
34	36	175,0000	34	37	316,0000
38	37	9999,0000	37	39	144,0000
37	40	316,0000	30	38	717,0000
39	40	144,0000	40	41	144,0000
40	42	144,0000	41	42	144,0000
43	44	160,0000	34	43	160,0000
44	45	160,0000	45	46	144,0000
46	47	144,0000	46	48	144,0000
47	49	144,0000	42	49	330,0000
42	49	330,0000	45	49	175,0000
48	49	144,0000	49	50	316,0000
49	51	316,0000	51	52	316,0000
52	53	160,0000	53	54	175,0000

continua na próxima página

Tabela A.1: Limites de potência ativa para a rede IEEE-118 continuação

de	para	P_{max} (MW)	de	para	P_{max} (MW)
49	54	320,0000	49	54	320,0000
54	55	350,0000	54	56	260,0000
55	56	144,0000	56	57	316,0000
50	57	316,0000	56	58	316,0000
51	58	316,0000	54	59	514,0000
56	59	230,0000	56	59	230,0000
55	59	175,0000	59	60	175,0000
59	61	175,0000	60	61	187,0000
60	62	175,0000	61	62	175,0000
63	59	9999,0000	63	64	776,0000
64	61	9999,0000	38	65	717,0000
64	65	776,0000	49	66	932,0000
49	66	932,0000	62	66	175,0000
62	67	175,0000	65	66	9999,0000
66	67	175,0000	65	68	1493,0000
47	69	144,0000	49	69	144,0000
68	69	9999,0000	69	70	160,0000
24	70	160,0000	70	71	160,0000
24	72	160,0000	71	72	160,0000
71	73	187,0000	70	74	144,0000
70	75	144,0000	69	75	144,0000
74	75	144,0000	76	77	144,0000
69	77	144,0000	75	77	144,0000
77	78	144,0000	78	79	175,0000
77	80	254,0000	77	80	254,0000
79	80	175,0000	68	81	717,0000
81	80	9999,0000	77	82	127,0000
82	83	288,0000	83	84	203,0000
83	85	144,0000	84	85	187,0000
85	86	144,0000	86	87	201,0000
85	88	187,0000	85	89	187,0000
88	89	187,0000	89	90	748,0000
89	90	748,0000	90	91	144,0000
89	92	374,0000	89	92	374,0000
91	92	144,0000	92	93	144,0000
92	94	144,0000	93	94	144,0000
94	95	144,0000	80	96	187,0000
82	96	144,0000	94	96	144,0000
80	97	187,0000	80	98	175,0000
80	99	175,0000	92	100	175,0000
94	100	288,0000	95	96	144,0000
96	97	187,0000	98	100	175,0000
99	100	175,0000	100	101	175,0000
92	102	175,0000	101	102	175,0000
100	103	144,0000	100	104	175,0000
103	104	144,0000	103	105	144,0000
100	106	175,0000	104	105	144,0000
105	106	144,0000	105	107	144,0000
105	108	127,0000	106	107	144,0000
108	109	127,0000	103	110	175,0000
109	110	127,0000	110	111	144,0000
110	112	127,0000	17	113	311,0000
32	113	311,0000	32	114	65,0000
27	115	65,0000	114	115	65,0000
68	116	200,0000	12	117	70,0000

continua na próxima página

Tabela A.1: Limites de potência ativa para a rede IEEE-118 continuação

de	para	P_{max} (MW)	de	para	P_{max} (MW)
75	118	130,0000	76	118	62,0000

Apêndice B

Divulgação da Pesquisa

Grilo A.P., Murari C.A.F., *A method based on fuzzy logic for selection of contingencies in electrical energy transmission systems*, apresentado no XI Encuentro Regional Iberoamericano de Cigré (ERIAC), Ciudad del Este, Paraguay, maio - 2005.