MÁRIO ROBERTO BASTOS

**Metodologia Model Free para Consciência Situacional Evolutiva da
Estabilidade de Tensão de Sistemas Elétricos de Potência**

São Paulo
(2019)

MÁRIO ROBERTO BASTOS

**Metodologia Model Free para Consciência Situacional Evolutiva da
Estabilidade de Tensão de Sistemas Elétricos de Potência**

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Doutor em Ciências

Área de Concentração: Engenharia da
Computação

Orientador: Prof. Dr. José Sidnei Colombo
Martini

São Paulo
(2019)

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Bastos, Mário Roberto

Metodologia Model Free para Consciência Situacional Evolutiva de Estabilidade de Tensão de Sistemas Elétricos de Potência / M. R. Bastos -- versão corr. -- São Paulo, 2019.
91 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais.

1.Sistema de Potência 2.Estabilidade de Tensão 3.Model Free
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais II.t.

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor, orientador Dr. José Sidnei Colombo Martini pela orientação, dedicação, confiança e paciência durante todo o processo de elaboração deste trabalho.

Aos meus familiares pelas orações e incentivos em todo momento.

Aos professores do programa de Pós Graduação e à Universidade de São Paulo pela oportunidade.

Aos professores examinadores pelo aceite ao convite de participar da banca.

Aos amigos Hélio Ranawa, Wilson e Renê Peric, da ISA CTEEP pelo apoio e atenção dispendidos.

Aos amigos da CONPROVE, pelo apoio e atenção dispendidos.

Por fim, meus sinceros agradecimento a todos aqueles que tornaram possível a realização deste trabalho.

A perfeição não é alcançada quando não há
mais nada a ser incluído, mas sim quando
não há mais nada a ser retirado

Antoine de Saint-Exupéry

RESUMO

Devido à crescente demanda por energia elétrica na sociedade atual e o potencial congestionamento dos sistemas de transmissão, os aspectos de segurança no fornecimento de energia, de confiabilidade e da estabilidade dos sistemas elétricos de potência tornam-se cada vez mais prementes. Considerando o tamanho e complexidade crescentes e o seu uso em situações limites, os estudos e avaliações do SEP (Sistema Elétrico de Potência) demandam considerável poder computacional, além de utilização de modelos matemáticos para os diversos equipamentos que o compõe. Necessária, portanto, tanto a representação correta do SEP com as interligações (topologia da rede elétrica) de seus elementos constituintes, quanto a exatidão dos modelos matemáticos dos geradores, estabilizadores, compensadores, transformadores e linhas de transmissão, dentre outros equipamentos. A proposta deste trabalho é a definição de uma metodologia para análise e estudo do SEP que independa: dos modelos matemáticos dos equipamentos, do conhecimento prévio da topologia da rede elétrica e dos equivalentes adotados para as redes externas (de outras empresas). A metodologia é uma abordagem Model-Free no sentido em que busca a partir das informações aquisitadas do processo elétrico, determinar o comportamento do SEP, de modo totalmente independente dos modelos matemáticos dos equipamentos, do conhecimento prévio da sua topologia e da existência ou não de redes externas.

A metodologia fornece informações quanto à instabilidade do SEP, ao identificar “assinaturas” características da evolução de seu comportamento, seja em operação normal ou sob contingências, as quais podem ou não resultar em uma condição de instabilidade do mesmo. As assinaturas são identificadas ao se analisar o comportamento das tensões das barras do SEP, dentro de uma abordagem Fuzzy que classifica as barras coerentes em tensão. A dinâmica do estado operacional do SEP é, então, obtida a partir do comportamento desta classificação.

Palavras-Chave: Sistemas de potência. Estabilidade de tensão. Model free.

ABSTRACT

Due to the growing demand for electric power in today's society and the potential congestion of transmission systems, security aspects in power supply, reliability and stability of power systems are becoming more and more pressing. Considering the increasing size and complexity and its use in limit situations, the studies and evaluations of the EPS (Electrical Power System) require considerable computational power, as well as the use of mathematical models for the various equipment that compose it. Therefore, it is necessary the correct representation of the EPS with the interconnections (topology of the electrical network) of its constituent elements, as well as the accuracy of the mathematical models of generators, stabilizers, compensators, transformers and transmission lines, among other equipment. The purpose of this work is the definition of a methodology for the analysis and study of EPS, independent of: mathematical models of the equipment, previous knowledge of the topology of the electrical network and the equivalents adopted for the external networks (of other companies). The methodology is a Model-Free approach in the sense that it searches from the acquired information of the electrical process, to determine the behavior of the EPS, totally independently of the mathematical models of the equipment, the previous knowledge of its topology and the existence or not of external networks. The methodology provides information on the instability of the EPS by identifying "signatures" characteristic of the evolution of its behavior, whether in normal operation or under contingencies, which may or may not result in a condition of instability of the same. The signatures are identified by analyzing the behavior of the EPS busbar voltages, within a Fuzzy approach that classifies the coherent buses into voltage. The dynamics of the operational state of the EPS is then obtained from the behavior of this classification.

Keywords: Power Systems. Stability of voltage. Model free

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Divisão do Sistema Elétrico de Potência	4
Figura 2 – Estabilidade do SEP	11
Figura 3 - Índices de Estabilidade	21
Figura 4 - Sistema CIGRE 225 KV test system	23
Figura 5 - Sistema de 16 geradores	28
Figura 6 - Arquitetura do Preceptor	38
Figura 7 – Preceptor	40
Figura 8 – IEEE 39-BUS	42
Figura 9 – Ferramenta PS Simul	58
Figura 10 – Caso 1 Estável – Gráfico dos Módulos Tensões de todas as barras. Visão parcial	60
Figura 11 - Caso 1 Estável – Comportamento dos Clusters	61
Figura 12 – Assinatura do Sistema IEEE 39-bus, em operação estável	61
Figura 13 – Cluster 1 para o caso 1	62
Figura 14 – Cluster 2 para o caso 2	62
Figura 15 – Caso 1 – Composição da assinatura	63
Figura 16 – Caso 10 – Instabilidade devido a uma falta trifásica a terra	64
Figura 17 - Caso 10 – Clusters	65
Figura 18 – Caso 10 – Composição dos clusters	65
Figura 19 – Caso 251 Carregamento não causa instabilidade	68
Figura 20 – Caso 251 – Clusters	69
Figura 21 – Caso 299 – Instabilidade devido a excesso de carga	70
Figura 22 – Caso 299 – Instável – Clusters	71
Figura 23 – Caso 256 – Estável – Carregamento e falta A-B-T	72
Figura 25 – Caso 256 – Estável – Clusters	73

Figura 25 – Caso 258 – Carregamento com falta A-B-C	74
Figura 26 – Caso 258 – Clusters	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados do circuito CA	43
Tabela 2 – Dados dos transformadores	44
Tabela 3 – Descrição dos casos de 1 a 100	47
Tabela 4 - Descrição dos casos de 101 a 180	50
Tabela 5 – Descrição dos casos de 181 a 216	52
Tabela 6 – Descrição dos casos de 217 a 250	53
Tabela 7 – Grupos de barras	54
Tabela 8 – Casos 251 a 300 - Carregamento das barras	56

LISTA DE SÍMBOLOS

$ISE\delta$ - Integral do quadrado da diferença do ângulo do rotor

$ISE\omega$ - Integral do quadrado da diferença da velocidade do rotor

$IAE\delta$ - Integral da magnitude absoluta da diferença do ângulo do rotor

$IAE\omega$ - Integral da magnitude absoluta da diferença da velocidade do rotor

$MAE\delta$ - O máximo da magnitude absoluta da diferença do ângulo do rotor

$MAE\omega$ - O máximo da magnitude absoluta da diferença da velocidade do rotor

ϵ_i - Tolerância desejada para cada critério de coerência

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Apresentação	2
1.2 Objetivo	6
1.3 Motivação	6
1.4 Abrangência	8
1.5 Organização	9
2 CONCEITOS BÁSICOS	10
2.1 Segurança de Sistemas Elétricos de Potência	10
2.1.1 Segurança Estática	11
2.1.2 Segurança Dinâmica	11
2.2 Redes Neurais Artificiais	12
2.2.1 Mapa de KOHONEN	12
2.3 Lógica FUZZY	13
3 ESTADO DA ARTE	15
3.1 Métodos FUZZY para análise do SEP	16
3.2 Redes Neurais para análise do SEP	30
4 METODOLOGIA PROPOSTA	37
4.1 Considerações gerais	37
4.2 Metodologia – PRECEPTOR	38
4.3 Modelos IEEE	41
4.3.1 Sistema IEEE 39-Bus	41
4.4 Algoritmo Fuzzy Isodata	44
4.5 Simulações	46
CONCLUSÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	76
REFERÊNCIAS	79
ANEXO A – IEEE 10 Generator 39 Bus System	84

1 INTRODUÇÃO

Devido à crescente demanda por energia elétrica na sociedade atual e o potencial congestionamento dos sistemas de transmissão, os aspectos de segurança no fornecimento de energia, da confiabilidade e da estabilidade dos sistemas elétricos de potência tornam-se cada vez mais prementes.

O congestionamento do sistema de transmissão decorre da sua lenta expansão, agravada pelo fato de que nos mercados de energia desregulamentados, busca-se a transferência de grandes blocos de energia para áreas com déficit de geração (centros de carga), geralmente localizadas a consideráveis distâncias dos centros de geração.

Como esta combinação de transmissão de grandes blocos de energia por longas linhas tende a maiores perdas reativas no sistema (Esaka et al. (2004)), a operação dos sistemas elétricos de potência enfrenta, constantemente, o desafio de operar estes sistemas de forma segura, tendo em perspectiva as incertezas tanto da geração quanto do consumo, assim como as margens de segurança operacional disponíveis.

A inabilidade de um sistema de potência de atender a energia elétrica demandada resulta em uma instabilidade de tensão local, que pode ainda se estender por uma região ou mesmo para todo o sistema de potência, resultando neste caso em um blackout.

Devido a possibilidade de uma instabilidade de tensão local se espalhar para todo o sistema de potência, o conhecimento das margens de estabilidade de tensão de cada barra de carga é uma importante informação para os operadores de sistema, conforme ressaltado por Shakerighadi et al. (2015).

Desta forma, métodos que permitam, em tempo real, a identificação da condição de estabilidade podem auxiliar a tomada de decisão de ações de controle corretivas imediatas, de forma a se evitar uma situação de instabilidade eminente, conforme Guo e Milanovic (2015).

1.1 Apresentação

Um típico sistema elétrico de potência constitui um processo multiváriavel de elevada ordem, cuja resposta dinâmica é influenciada pelas interações entre um grande conjunto de dispositivos, com diferentes características e taxas de respostas.

Caracteriza um grande e complexo sistema altamente não-linear (Machias; Souflis e Dialynas (1986)), operando em um ambiente em constante mudança; no qual se observam variações de cargas, saídas não programadas de geradores e uma contínua variação dos principais parâmetros operacionais. O SEP para ser viável, deve ser apto a se ajustar a este ambiente mutável e continuar a operar satisfatoriamente, de uma forma estável.

Índices que possam informar o quanto um sistema elétrico de potência é estável ou instável são objetos de estudos nas ultimas décadas, tendo como objetivo, a busca de uma forma rápida e confiável de se analisar perturbações que possam ocorrer no SEP (Oliveira; Padilha e Minussi (2003)).

A estabilidade do SEP pode ser considerada como uma propriedade do movimento do mesmo, em torno de um ponto de equilíbrio (condição inicial de operação), podendo ser definida, conforme Kundur et al. (2004) e Dong et al. (2013), como sendo:

A habilidade do SEP, para uma dada condição inicial de operação, recuperar um estado de equilíbrio operacional após ter sido submetido a uma perturbação física, com a maioria das suas variáveis mantidas dentro de limites definidos, de modo que praticamente todo o sistema permaneça íntegro.

Conforme os sistemas elétricos de potência evoluíram, com o crescimento contínuo de suas interligações, na sua adoção de novas tecnologias e controles, e no aumento das suas condições de alto estresse de operação, novas e diferentes formas de instabilidade passaram a se manifestar; como por exemplos: estabilidade de tensão, estabilidade de frequência e oscilações inter-áreas (Kundur et al. (2004) e Assis; Nohara e Valentini (2009)).

Adicionalmente, devido a esta grande dimensão dos SEP atuais, os aplicativos de análise utilizados, geralmente não consideram uma modelagem mais detalhada da totalidade dos sistemas sob estudo (El-arini e Fathy (2010)). Ainda, conforme Lino; Fette e Dong (2005) e Wilfert; Voithlander e Erlich (2001), o desenvolvimento de uma abordagem prática para análises de estabilidade do SEP, utilizando recursos computacionais e técnicos limitados, demanda uma redução dimensional do sistema em análise, considerando, para tal, a utilização de modelos equivalentes de mais baixa ordem.

As restrições encontradas na modelagem detalhada de grandes sistemas podem ser caracterizadas por vários aspectos; tais como excessivo tempo computacional requerido (principalmente quando se executando simulação dinâmica e programas de análise de estabilidade), alta complexidade dos modelos dos elementos constituintes do sistema e das suas interações; além do que partes do sistema, distantes do ponto de ocorrência do distúrbio, têm pouco efeito na dinâmica do mesmo, sendo desnecessária sua modelagem mais detalhada e grande precisão.

El-arini e Fathy (2010) e Kamwa et al. (2010) ressaltam também que, como partes do sistema interligado podem ser ativos de diferentes empresas, cada uma com seus próprios Centros de Controle, estas tendem a tratar as demais partes do sistema, que não de sua propriedade, como sendo subsistemas externos, utilizando para tal, modelos equivalentes para seus estudos. Lino; Fette e Dong (2005) e Wilfert; Voithlander e Erlich (2001) citam como um importante aspecto desta situação, a limitada troca de informações entre estas empresas, tendo em vista os seus interesses econômicos dentro de um crescente mercado de concorrência.

Wang e Huang (2004) comentam que métodos para redução de ordem dos modelos são geralmente utilizados para aliviar a complexidade computacional, simplificar a análise do sistema e, portanto para minimizar tempo e custos.

O processo de redução de ordem envolve a transformação de um sistema de mais alta ordem em um sistema de menor ordem através de algum tipo de processamento, preservando um ou mais relacionamentos entre estes dois modelos;

de forma que apresentem similaridades em determinadas características consideradas no processo. Desta forma o modelo reduzido representa um equivalente dinâmico que preserva propriedades do sistema original de mais alta ordem (Lino; Fette e Dong (2005)).

Uma possível redução da complexidade computacional dependerá da habilidade de se utilizar modelos aproximados, assim como, também, do tipo de evento que se deseja estudar (Kundur et al. (2004)).

A possibilidade de adoção de um modelo de menor ordem equivalente do sistema original, poderia então resultar na redução do tempo computacional requerido para a determinação da estabilidade do SEP.

Nesta abordagem, o sistema original é dividido em dois sistemas denominados: sistema de estudo e sistema externo El-arini e Fathy (2010), Sastry e Varaiya (1981) ou área interna e área externa, conforme Lino; Fette e Dong (2005) e Djukanovic (1992).

Figura 1 - Divisão do sistema elétrico de potência.

Fonte: Adaptado de El-arini e Fathy (2010).

Desta forma, as análises da segurança do sistema elétrico de potência são efetuadas para uma parte específica do sistema interligado, sendo o sistema restante (externo), considerado no nível de detalhes que realmente afetem a análise do sistema considerado.

O sistema externo é aproximado por um modelo equivalente de mais baixa ordem, de forma a reduzir a carga computacional e quantidade de informações necessárias, sem introduzir uma perda intolerável de precisão nos resultados das análises (Sastry e Varaiya (1981)).

Uma abordagem similar foi aqui adotada, focada na avaliação de estabilidade de tensão em tempo real, buscando-se a determinação de um equivalente de ordem reduzida do sistema completo, caracterizado por conjuntos variáveis de barras coerentes cujo comportamento sinalize a evolução do sistema elétrico em estudo.

Esta metodologia proposta é uma abordagem Model-Free no sentido em que busca a partir das informações aquisitadas do processo elétrico, determinar o comportamento do SEP, de modo totalmente independente dos modelos matemáticos dos equipamentos, do conhecimento prévio da sua topologia e da existência ou não de redes externas.

A adoção de técnicas de inteligência artificial para tratar o problema em foco, baseou-se nas vantagens desta abordagem (Dong et al. (2013)), a qual pode capturar diretamente o relacionamento entre estados de operação do sistema de potência e informações de estabilidade do mesmo:

- Rapidez
- Construção do conhecimento a partir de base de dados
- Necessidade de menor quantidade de dados
- Grande capacidade de generalização
- Versatilidade

1.2 Objetivo

"Tudo deve ser feito da forma mais simples possível, mas não mais simples que isso"

Albert Einstein

A condição dinâmica de estabilidade de um sistema elétrico de potência (SEP), assim como a sua previsão poderia ser avaliada, em tempo real, pelo comportamento de conjuntos de barras coerentes do mesmo?

A migração de barras de um conjunto para o outro e/ou o processo de criação e de extinção destes conjuntos poderia fornecer um índice que expresse a margem de estabilidade do SEP, ou mesmo a previsão de seu comportamento (trajetória) dentro de uma janela de tempo futuro?

Neste trabalho abordam-se estas questões considerando-se uma redução de dimensionalidade do SEP, através da determinação de conjuntos de barras coerentes, que possam representar o SEP em um modelo equivalente reduzido.

1.3 Motivação

"Nosso planejamento tem a tendência de confundir o desconhecido com o improvável. A contingência que não levamos seriamente em consideração nos parece estranha; imaginamos que o que parece estranho seja improvável; o que é improvável não precisa ser levado seriamente em consideração"

Dr. Thomas Schelling

Nobel de Economia (2005)

Economista Americano

Observa-se atualmente uma maior preocupação com os diversos tipos de instabilidades decorrentes da evolução do SEP, caracterizada pelo crescimento contínuo de suas interligações, do uso intenso de novas tecnologias e sistemas de

controles, conjuntamente com sua atual operação em condições de alto stress (Kundur et al. (2004)) e (Chakraborty et al. (2011)).

Após a desregulação dos mercados de energia, os sistemas de potência estão sendo operados mais próximos aos seus limites de estabilidade e de máxima capacidade (Sui et al. (2008)). Esta situação decorre da necessidade de maior eficiência no uso dos ativos destes sistemas, agravada pelas crescentes restrições ambientais e limitação de espaço, e custos decorrentes, para as instalações de novos ativos.

Observa-se também uma crescente complexidade dos sistemas de potência com a interligação de sistemas regionais, assim como maiores incertezas de mercado, devido a entrada em operação de novas modalidades de geração de energia elétrica (Guo e Milanovic (2015)).

Nesta situação, erros humanos, falhas do sistema de proteção, conexões fracas entre sistemas distintos, dentre outros fatores, podem levar o sistema de potência a uma situação de instabilidade e mesmo a uma falha catastrófica (Demetriou et al. (2015)).

Dentro deste contexto e ainda com o crescente aumento da demanda por energia elétrica, um conhecimento mais preciso, em relação ao estado operacional dos sistemas de potência, torna-se um requisito cada vez maior na manutenção da sua confiabilidade de operação, buscando continuidade, qualidade e segurança no fornecimento de energia elétrica aos consumidores. Caracteriza-se uma necessidade crescente por informações mais precisas e imediatas do processo elétrico (Belašić et al. (2015)).

Por outro lado, temos que o planejamento e a operação do SEP demandam o conhecimento da sua estabilidade, considerando um ambiente diversificado de condições de contingências e de perfis de consumo (Djukanovic (1992)), e para tal é necessário também o conhecimento de seu comportamento.

O comportamento do SEP representa o resultado global das interações entre a totalidade de suas partes constituintes; com toda a complexidade das interações elétricas, mecânicas e térmicas, dentre outras, implícita neste comportamento.

A avaliação em tempo real da estabilidade tende a propiciar significantes benefícios financeiros e de engenharia. Permitindo a possível operação do sistema elétrico de potência com margens operacionais cerca de dez ou mais vezes menores, ao utilizar configurações e condições operacionais dinâmicas reais ao invés das condições de pior caso, como as consideradas nos estudos off-line (Chiang; Tong e Tada (2010)).

Uma pesquisa pela literatura apresenta várias abordagens para o tema de estabilidade. Observa-se que nestas, existe a necessidade de se utilizar parâmetros dos diversos equipamentos e sistemas em estudo, ou seja, é necessária a modelagem linear e/ou não linear dos sistemas e subsistemas. Ficam, portanto, dependentes da exatidão da modelagem utilizada para descrever os sistemas, seus parâmetros e suas diversas interações externas e internas.

Uma abordagem que, possa propiciar em tempo real, a determinação de índices de estabilidade e a previsão de curto prazo do estado futuro do SEP, a partir de seu comportamento, sem necessitar da complexa modelagem do mesmo, constitui uma ferramenta com grande potencial de auxílio às tarefas de planejamento e de operação do SEP.

1.4 Abrangência

"A perfeição não é alcançada quando já não há mais nada para adicionar, mas quando já não há mais nada que se possa retirar."

Antoine de Saint-Exupéry

Neste trabalho desenvolve-se uma metodologia que propicia a obtenção, em tempo real, da previsão de curto prazo do comportamento dinâmico do SEP.

A partir da análise Fuzzy obtém-se as informações que definem o comportamento do SEP, e constituem uma assinatura dinâmica do seu comportamento, permitindo avaliar o comportamento atual do mesmo quanto a sua situação de estabilidade.

O método será testado com os dados do sistema IEEE 39-Bus.

1.5 Organização

O trabalho fica organizado da seguinte forma:

O Capítulo 2 apresenta a fundamentação conceitual de segurança de sistemas de potência e Lógica Fuzzy.

O Capítulo 3 trata do estado da arte no uso de redes neurais e Lógica Fuzzy em sistemas de potência.

A metodologia desenvolvida nesta tese encontra-se descrita no Capítulo 4.

As conclusões finais e sugestões de trabalhos futuros estão no Capítulo 5.

2 CONCEITOS BÁSICOS

Transportai um punhado de terra todos os dias e fareis
uma montanha.

Confúncio

A confiabilidade de um SEP é particularmente vital no atual ambiente de mercado vivenciado pelo setor de energia elétrica. Confiabilidade é definida como a habilidade do SEP de suprir a demanda de todos os seus consumidores, de forma contínua e com qualidade aceitável (Fotuhi e Ghafouri (2007)).

Também conforme estes autores, tendo em vista que as condições dos diversos elementos do SEP que influenciam na sua confiabilidade sofrem variações no decorrer do tempo, a melhor abordagem para uma avaliação desta confiabilidade seria a sua determinação em tempo real. Implicando, portanto, na necessidade de avaliações de confiabilidade efetuadas em curtos períodos de tempo.

Considerando que o SEP caracteriza-se como um grande e complexo sistema com comportamento não linear (Machias; Souflis e Dialynas (1986)) e (Kundur et al. (2004)), a análise da dinâmica do mesmo apresenta-se como uma tarefa complexa e de considerável dificuldade, que deve considerar as interações de todas as suas partes constituintes, sob diferentes condições ambientais e operacionais, relacionadas para cada um dos intervalos de tempo em estudo.

2.1 Segurança de Sistemas Elétricos de Potência

A chave para a avaliação da segurança do sistema elétrico de potência está relacionada com a determinação de uma metodologia de avaliação razoável e abrangente e seus índices associados (Ming et al. (2010)).

Observa-se que nas últimas décadas muito se tem estudado na busca de índices que informem o quanto um sistema elétrico de potência é estável ou não durante a ocorrência de uma grande perturbação no mesmo ((Oliveira; Padilha e Minussi

(2003)). Buscam-se, na realidade, formas rápidas e confiáveis de se analisar as grandes ocorrências no sistema elétrico.

2.1.1 Segurança Estática

A avaliação da segurança estática do SEP é geralmente desenvolvida utilizando-se algoritmos de fluxo de carga. Considera-se, para um determinado ponto de operação, que o SEP apresenta estabilidade estática se os níveis de tensão em todas as suas barras estão dentro dos valores permitidos, e se os fluxos de potência em todas as linhas e transformadores estão dentro de seus limites térmicos (Assis; Nohara e Valentini (2009)).

2.1.2 Segurança Dinâmica

Segurança dinâmica envolve diferentes tipos de estabilidade, incluindo estabilidade transitória, estabilidade de tensão, e de pequenos sinais.

Conforme Machias; Souflis e Dialynas (1986), a análise da estabilidade transitória implica na consideração de três diferentes estados de operação do SEP: o estado pré falta, antes do distúrbio; o estado em situação de falta e o estado pós-falta (após a eliminação do distúrbio).

Figura 2 - Estabilidade do SEP.

Fonte: Kundur et al. (2004)

2.2 Redes Neurais Artificiais

Conforme Oliveira; Padilha e Minussi (2003), redes neurais são concepções de hardware e/ou software que exibem a capacidade de aprender com a experiência, através de um processo adaptativo (supervisionado ou não) baseado em estímulos aplicados na sua entrada (etapa de treinamento da rede). Após a conclusão, com êxito, da etapa de treinamento, a rede neural está apta a desempenhar as funções para as quais foi treinada.

2.2.1 Mapa de KOHONEN

Os mapas auto-organizáveis têm a habilidade de reconhecer relacionamentos entre dados abstratos, podendo ser considerados como um método de análise não linear de componentes principais (Wilfert; Voithlander e Erlich (2001)). Com o uso de mapas auto-organizáveis, a alta dimensionalidade dos dados de entrada é projetada em um arranjo bidimensional de neurônios artificiais.

A classificação dos dados de entrada em distintos grupos é possível devido ao fato de que o grau de excitação de cada um dos neurônios do mapa representa as similaridades existentes entre os diversos dados de entrada. A quantidade de neurônios do mapa auto-organizável define o número máximo de conjuntos possíveis de serem constituídos.

A estrutura do mapa de Kohonen consiste de uma camada de neurônios altamente interconectados, de modo que cada neurônio está conectado com todos os outros neurônios desta camada (inibição lateral) e com cada um dos neurônios da camada de entrada, a qual faz o papel de um buffer de entrada.

O algoritmo de Kohonen (1990) é um eficiente processo de auto-organização, o qual produz de modo não supervisionado, a distribuição de um espaço de entrada em outro espaço de menor dimensão, preservando as relações topológicas entre os vetores de entrada.

O algoritmo utiliza aprendizado competitivo, um processo de aprendizado que divide um conjunto de padrões de entrada em clusters que são inerentes a estas entradas.

Os padrões de entrada são divididos em conjuntos disjuntos tais que similaridades entre padrões de entrada de um mesmo cluster são maiores do que as similaridades entre padrões de entrada em clusters diferentes.

2.3 Lógica FUZZY

Lógica Fuzzy formaliza a capacidade humana de pensar de forma imprecisa, onde todas as verdades são parciais ou aproximadas (Assis; Nohara e Valentini (2009)).

Fawcett (2001) ressalta que regras são comumente utilizadas em mineração de dados por serem simples, intuitivas, modulares e diretamente extraíveis do conjunto de dados estudado. Mas observa que uma questão em aberto em mineração de dados é o como utilizar um conjunto de regras para produzir informações de confiabilidade. Levantam-se questões de como se gerar pontuações para as regras, de como combinar as pontuações de diferentes regras, e de como se selecionar regras para inclusão em um dado conjunto de regras já existente.

Para esta avaliação, no seu artigo, Fawcett (2001) utiliza a área sob uma curva ROC (comumente referida como AUC) para avaliar e comparar estratégias adotadas para obtenção e validação de regras.

Conforme Prati; Batista e Monard (2008), ROC é um método gráfico para avaliação, organização e seleção de sistemas de diagnósticos e/ou de predição. Sendo originalmente utilizado em detecção de sinais para se avaliar qualidade de transmissão de um sinal em um canal com ruído.

Gráficos ROC tem ampla aplicação em distintos campos do conhecimento, tais como: psicologia, na avaliação da capacidade de indivíduos distinguirem entre estímulo e não estímulo; medicina, na análise da qualidade de um determinado teste clínico; economia, na avaliação de desigualdade de renda; previsão de tempo, para avaliação da qualidade da predição de eventos raros; e mais recentemente em

aprendizagem de máquina e mineração de dados, para avaliação de modelos de classificação.

Adicionalmente, Fawcett (2001) aborda as regras, seus conjuntos, e de como eles podem ser usados para se efetuar uma classificação. É também apresentada uma série de experimentos que investigam o uso de regras de classificação e a sua avaliação.

Outra abordagem de classificação é o algoritmo FCM (Fuzzy C-Means), que é um método de classificação em conjuntos que permite associar um elemento como sendo pertencente a dois ou mais clusters (conjuntos). Este método, desenvolvido por Dunn em 1973 e aprimorado por Bezdek em 1981, é geralmente utilizado em tarefas de reconhecimento de padrões.

FCM utiliza conceitos de espaço Euclidiano n-dimensional para se determinar a vizinhança geométrica dos vários elementos, atribuindo-os a vários clusters e determinando a distância entre estes clusters (El-arini e Fathy (2001)).

O resultado da classificação Fuzzy é uma partição suave do grupo inicial de elementos não classificados em diversos conjuntos; com uma maior flexibilidade de descrição da estrutura dos dados sob estudo (Wang e Huang (2005)).

Existem ocasiões e que é necessário o levantamento do comportamento de um processo, mesmos sem se saber nada sobre a dinâmica do mesmo. Uma ferramenta que possibilite a extração automática das regras que descrevam o comportamento de um processo pode ser implementada com o uso de Lógica Fuzzy (Mendes; Seco e Araujo (2011)) em processo industrial, (Zeng; Yongbao e Jiang (2005)) em geral e (Pavithra (2014)) em seleção de conteúdo de vídeos.

(Mendes; Seco e Araujo (2011), apresentam um método hierárquico híbrido Fuzzy – Genético aplicado na extração automática de todos os parâmetros de um controlador lógico Fuzzy, enquanto que Zeng; Yongbao e Jiang (2005), apresentam um sistema Fuzzy, também hierárquico, mas de aplicabilidade genérica, o qual foi validado em controle de um robô móvel em ambiente congestionado.

3 ESTADO DA ARTE

Se pudermos primeiro saber onde estamos e para onde estamos tendendo, poderemos melhor avaliar o que fazer e como fazê-lo.

Abrahan Lincoln

A velocidade computacional de muitos dos programas aplicativos utilizados em sistemas elétricos de potência é proporcional à dimensão das matrizes que representam matematicamente tais sistemas (Kamwa et al. (2009)).

Com a crescente complexidade dos sistemas elétricos de potência e a necessidade de se obter resultados mais precisos de seu comportamento, observa-se uma exigência de uso de modelos equivalentes mais eficientes (Djukanovic (1992)), com menores cargas computacionais.

Ainda conforme Djukanovic (1992), o desenvolvimento de equivalentes dinâmicos, pode ser justificado pelas seguintes considerações:

- O modelo original pode ser não econômico em relação ao tempo requerido para o seu processamento
- Os parâmetros, estrutura e condições operacionais dos sistemas interconectados não estão disponíveis e/ou são imprecisos
- O fenômeno de interesse não necessita de alto nível de detalhamento, especialmente em relação aos sistemas externos
- A maioria das análises são efetuadas para porções específicas dos sistemas interligados (sistema de estudo), as quais geralmente coincidem com o domínio de uma concessionária em particular

Métodos de avaliação de coerência ou de reconhecimento de padrões podem ser utilizados para reduzir um grande sistema elétrico de potência para um tamanho (escala) que permita ser tratado de forma mais rápida, tornando possível o aumento significativo da performance dos aplicativos de análise de estabilidade, dos cálculos dos efeitos de contingências e das ações de controle daquelas áreas mais afetadas

do SEP. A utilização de equivalentes dinâmicos, devido a representação mais simples do sistema original, permite um maior entendimento do comportamento do SEP.

Esta seção objetiva realizar uma investigação sobre os vários métodos propostos para avaliação de estabilidade de sistemas de potência que utilizem abordagens com Lógica Fuzzy e mapas de Kohonen. Busca-se identificar as características destes métodos baseando-se nas implementações, efetuadas pelos pesquisadores da área, no domínio das aplicações que buscam o tratamento do problema proposto.

Dentre as abordagens que utilizam Lógica Fuzzy, como classificador, um dos pontos em aberto é a determinação do número adequado de conjuntos Fuzzy que deve ser adotado para cada um dos estudos realizados. Verifica-se, em geral, que o número de conjuntos geralmente é adotado pelo autor do trabalho, apesar de se encontrar casos com estudos sistemáticos no sentido de se verificar qual o número adequado de conjuntos para uma dada aplicação (Journaux et al. (2014)) e (Xu, 2015).

Observa-se que uma classificação das abordagens Fuzzy, pode ser delineada como:

- Métodos que tratam da coerência de frequência e ângulo entre geradores do SEP
- Métodos que tratam de coerência de tensão e ângulo entre barras do SEP
- Métodos que tratam da confiabilidade e de novas abordagens para a análise do SEP

3.1 Métodos FUZZY para análise do SEP

Pode-se observar, dentre as várias abordagens estudadas, a utilização de Lógica Fuzzy em trabalhos de análise do SEP para incorporar as incertezas das diversas informações relacionadas com o SEP (Fotuhi e Ghafouri (2007)).

Neste enfoque, a Lógica Fuzzy é utilizada para a "fuzzificação / defuzzificação" das informações, na construção de regras especialistas que incorporam o conhecimento e lógica humanos, e na definição de classificação de eventos, de propriedades e de comportamento dos SEP (Kamwa et al. (2009)).

As aplicações envolvem análises de confiabilidade (Fotuhi e Ghafouri (2007)), estabilidade, detecção e localização de faltas (Soylemezoglu e Jagannathan (2011)), avaliação de métodos de análise (Amorim e Romero (2009)), definição de limiares de decisão em métodos de diagnoses e predição (Kuipeng and Peng (2010)), definição de índices para avaliação de segurança do SEP (Ming et al. (2010)).

Em Fotuhi e Ghafouri (2007), é proposta uma técnica para se avaliar a confiabilidade de sistemas elétricos de potência utilizando-se Lógica Fuzzy. A Lógica Fuzzy é utilizada para incorporação das incertezas na avaliação da confiabilidade do SEP.

As informações das condições climáticas, temperatura e carga local são convertidas para valores Fuzzy, através de funções de pertinência propostas pelos autores.

A curva de carga horária é utilizada para determinar as funções de pertinência de carga (leve, moderada, ponta), sendo a temperatura Fuzzy (muito baixa, baixa, moderada, alta e muito alta) calculada a partir da medida de temperatura atual e tendo também as variações sazonais consideradas baseando-se no número do dia atual (inverno, verão, outono, inverno).

A partir das funções de pertinências obtidas, são definidas as regras Fuzzy (base de regras), baseadas na lógica humana e no conhecimento de especialistas. As consequências desta base de regras são, então, utilizadas pelo módulo de inferência do tipo Mamdani para produzir os seus resultados (consequências). Estas consequências são convertidas pelo módulo “defuzzificador” para valores “crisp”, para uso nos cálculos de confiabilidade. Os índices Energia não Suprida e Rejeição de Carga Esperada são calculados por este método e os resultados são comparados com aqueles obtidos pelo método convencional.

O método proposto foi testado e validado, com diferentes condições de clima e de carregamento, com o IEEE Reliability Test System (IEEE RTS-96), o qual constitui um modelo IEEE de rede padrão para simulação e aplicação (testes) de métodos para cálculo de confiabilidade.

Soylemezoglu e Jagannathan (2011) apresentam um esquema de detecção, isolamento e prognóstico de faltas, baseado em um modelo de Sistema Mahalanobis-Taguchi (SMT). O Método Taguchi combina estatísticas e teoria econômica, com gestão de qualidade e engenharia resultando em uma tecnologia de avaliação da qualidade. Quando combinado com o conceito de distância de Mahalanobis constitui um novo método de reconhecimento de padrões, conhecido como Sistema Taguchi-Mahalanobis (MTS) (Kuipeng e Peng (2010)).

O esquema proposto por Soylemezoglu e Jagannathan (2011), integra dados provenientes de diversos e distintos sensores em um única métrica de performance utilizando Distância de Mahalanobis (MD) e efetua a classificação das faltas em conjuntos distintos, baseando-se nos valores de MD obtidos. Este sistema define um classificador, com uma escala contínua de medição, não dependendo de aprendizagem a partir de dados históricos. O sistema MTS inicia-se com uma coleção de dados obtidos a partir da observação de situações normais do processo a ser analisado.

A partir destes dados, escolhe-se uma combinação de características do processo em análise, e calcula-se a distância de Mahalanobis (MD) entre elas; de forma a verificar a habilidade de se diferenciar grupos característicos referentes à situações normais, daqueles de situações com anomalias. Na impossibilidade do MD identificar os grupos de situação normal, uma nova combinação de características do processo deve ser considerada. Uma vez que combinação correta é encontrada, os métodos Taguchi são então utilizados para se proceder à avaliação da contribuição de cada uma destas características, e caso possível uma redução de dimensionalidade é efetuada, eliminando-se aquelas características que não influenciam a análise.

Kuipeng e Peng (2010), ressaltam em que se utilizando Sistemas SMT, um elemento desconhecido pode ser distinguido com base em três características: um espaço de Mahalanobis, uma escala de medição (MD) e um valor limite (limiar).

O método utilizado é composto por quatro etapas: Construção do Espaço Base (espaço de Mahalanobis), confirmação da validade do espaço criado, otimização deste espaço base e, por último, e elaboração de diagnoses e predição.

Adicionalmente apresentam um algoritmo para se efetuar a determinação do valor de limiar, de acordo com a teoria dos conjuntos Fuzzy, em substituição ao processo de definição empírica dos mesmos.

O desenvolvimento de uma ferramenta computacional para a solução do problema de fluxo de potência ótimo descentralizado é apresentado por Amorim e Romero (2009). Nesta abordagem, o problema inicial é decomposto em vários subproblemas regionais de fluxo de potência ótimo. O trabalho emprega um algoritmo evolutivo multiobjetivo baseado na teoria de Pareto para a resolução dos vários subproblemas. A avaliação dos resultados da aplicação deste algoritmo é efetuada por um mecanismo de decisão baseado na teoria dos conjuntos Fuzzy.

Também neste trabalho observa-se o uso de um algoritmo de clusterização para proceder à redução da dimensão do conjunto Ótimo de Pareto, o qual representa um conjunto de soluções compromisso para as várias funções objetivo. Os autores dividem o problema original, em subproblemas regionais independentes, através do uso de algoritmos de decomposição, de forma que cada subproblema resultante possua localmente suas variáveis, restrições e funções objetivo.

A vantagem desta divisão em subproblemas é que a mesma permite que cada subproblema possa ter sua resolução efetuada sem interferir na solução dos subproblemas das áreas vizinhas. Podem-se ter soluções que atendam diferentes objetivos dependendo da necessidade do estudo em curso. São apresentados os resultados das simulações aplicadas nos sistemas de testes IEEE-RTS-96 e IEEE-354, para validação do modelo e da técnica de solução propostos.

Em Assis; Nohara e Valentini (2009) é proposta uma metodologia Neuro-Fuzzy para avaliação de estabilidade dinâmica do SEP, especificamente estabilidade transitória. A proposta combina a capacidade de aprendizagem das redes neurais com a interpretação linguística dos classificadores Fuzzy.

Os autores utilizam uma rede neural para estimar os índices de performance para cada contingência considerada, que são utilizados pelo processo Fuzzy para a classificação do estado operativo do sistema elétrico de potência. Adicionalmente, as situações que apresentaram dúvidas na classificação obtida podem ser identificadas e, avaliada a necessidade de uma análise mais detalhada usando simulação no domínio do tempo.

Considerando que a estabilidade transiente de um sistema elétrico de potência depende do ponto de equilíbrio antes da falta e das características da própria falta, os autores utilizaram como entradas da rede neural, variáveis que representam características dinâmicas do sistema e da contingência associada. Foram consideradas as variáveis: ângulo de rotor dos geradores antes da falta, a potência acelerante dos geradores durante a falta e a potência desacelerante dos geradores após a falta, tendo os respectivos significados: estado inicial, severidade do distúrbio e habilidade do sistema em atenuar os efeitos causados pelo distúrbio.

O método foi testado em um sistema real, parte do sistema elétrico de potência da região Sul do sistema brasileiro, com 45 barras, 10 geradores e 55 linhas, com tensões de 230KV e 525 KV, apresentando 71% dos casos estudados precisamente classificados não sendo registrado nenhum caso de erro de classificação crítico (sistema estável classificado como instável ou vice-versa).

A existência de 29 casos classificados como duvidosos sinaliza a necessidade de uma análise mais detalhada, uma vez que destes casos, 76% são realmente casos instáveis do ponto de vista de estabilidade transiente, conforme os autores.

Em Ming et al. (2010), os autores fazem uma análise dos vários fatores que afetam a segurança de um sistema elétrico de potência e adicionalmente propõem índices de avaliação desta segurança. Considerando que os resultados das avaliações geralmente são subjetivos e variáveis, além de dependerem de diversos outros fatores dos demais índices, os autores justificam a utilização de teoria Fuzzy dinâmica na sua análise e determinação.

Nesta proposição a teoria Fuzzy Dinâmica é utilizada para avaliar a segurança do SEP, considerando cinco índices sistêmicos principais: capacidade de fornecimento seguro, segurança estática de tensão, vulnerabilidade estrutural topológica, segurança transitória e graduação de riscos. Cada um destes índices é composto por diversos outros índices, conforme figura 3.

Figura 3 - Índices de Estabilidade

Machias; Souflis e Dialynas (1986) apresentam um índice de estabilidade transitória para avaliação em tempo real do estado do SEP. Para tanto, baseiam-se em princípios de reconhecimento de padrões (classificação) e teoria Fuzzy.

Os autores apontam dois tipos de dificuldades encontradas em vários trabalhos que tratam do reconhecimento de padrões na obtenção de regras para uso na avaliação de estabilidade transitória do SEP: como garantir que o erro de classificação esteja abaixo de um valor especificado e como avaliar o índice de margem de estabilidade do sistema.

É proposto um método alternativo isento destas dificuldades, baseado em um classificador de padrões, cujo critério de desempenho é definido linguisticamente (Fuzzy) e que também fornece um índice de estabilidade que representa a margem de estabilidade do SEP. A partir de uma formulação usual da dinâmica de sistemas potência, é definido um vetor padrão utilizando as acelerações iniciais dos rotores dos geradores após uma perturbação. Este vetor utilizado para a classificação dos geradores envolve o cálculo da matriz de admitância durante o período de falta.

O enfoque Fuzzy do método ficou por conta da regra linguística adotada para o critério de performance do classificador, definida por: Um sistema operando em um estado após a ocorrência de um distúrbio em particular e sob uma específica condição operacional pré-distúrbio é classificado como estando em um estado instável, se o módulo da diferença entre a máxima aceleração inicial e a aceleração inicial média ponderada dos rotores de todos os geradores presentes no sistema, tem um “grande” valor numérico.

Devido ao uso do termo linguístico “grande”, que introduz uma forma de incerteza na caracterização dos valores numéricos que definirão os estados instáveis, a utilização de métodos matemáticos convencionais torna-se inviável; sendo necessária, portanto, a utilização de uma abordagem Fuzzy no tratamento deste índice. Para proceder à transformação desta preposição Fuzzy “é grande” para valores numéricos, os autores propuseram e avaliaram duas funções de pertinência.

A determinação dos parâmetros das funções de pertinências envolve para cada contingência a ser analisada, a necessidade de execução de vários estudos off-line com o sistema em diferentes configurações e condições de carregamento. O considerável esforço computacional requerido para estes estudos pode ser reduzido, considerando-se apenas aquelas situações de carregamento mais pesado do sistema; onde ocorrem os maiores valores do módulo definido acima (Machias; Souflis e Dialynas (1986)). O método proposto é testado no sistema CIGRE 225 KV test system, com 10 barras, 13 linhas e 7 geradores, figura 4. Foi utilizado um conjunto de 60 instâncias deste sistema, com diferentes condições de configuração e carregamento.

Figura 4 - Sistema CIGRE 225 KV Test System

Fonte: Machias; Souflis e Dialynas (1986)

Este conjunto de dados foi estudado com a aplicação do método de integração passo-a-passo tradicional e do método proposto. Considerou-se um curto circuito trifásico na linha conectando as barras 4 e 5, localizado próximo à barra 4, seguida pela eliminação desta falta após 0,31 s e o religamento da linha. Os resultados

indicaram, para a situação estudada, erro máximo de 8,33%, correspondendo a 5 estados classificados erroneamente.

Várias propostas tratam da redução do SEP em sistemas equivalentes de mais baixa ordem (Kamwa et al. (2009)), (Wang e Huang (2004)) e (Lino; Fette e Dong (2005)).

Um grande sistema elétrico interligado pode ser constituído por sistemas proprietários de várias concessionárias de energia elétrica, apresentando desta forma uma divisão em áreas de operação e controle, conforme seu proprietário.

Cada uma das empresas proprietárias modela, em certo grau de detalhamento, seu sistema e representa os demais sistemas das outras concessionárias utilizando equivalentes externos (Kamwa et al. (2009)).

Um estudo de redução de ordem do SEP, utilizando Lógica Fuzzy para classificar os polos e zeros da função de transferência do SEP original em novos conjuntos, de forma que um sistema de menor ordem possa ser obtido é apresentado por Wang e Huang (2004). Este sistema de menor ordem deve preservar algum relacionamento em relação ao original, de modo a serem, de certa forma, equivalentes em relação às características consideradas para as análises.

É proposto um método baseado no algoritmo Fuzzy C-Means, usando métrica Euclidiana como medida de distância para agrupar os zeros e polos do sistema original em grupos de coerência que permitam ainda representar o sistema, ou seja, as informações originais de polos e zeros são substituídas pelos centros dos conjuntos obtidos na classificação, os quais agora representam os polos e zeros da função de transferência do sistema reduzido equivalente.

No artigo, os autores simulam os dois sistemas, original e o reduzido proposto, e apresentam a comparação das suas respostas. Os resultados apresentados atestam que os dois sistemas são equivalentes quanto às características estudadas.

É apresentado, por El-arini e Fathy (2010), um método para identificar grupos de geradores coerentes. O método se baseia na proposição de seis critérios de coerência, a partir da resposta no tempo de um modelo linearizado do sistema de potência e na aplicação do algoritmo de clusterização Fuzzy C-Means.

Os resultados obtidos, a partir de simulações no modelo de sistema de 14 barras/5 geradores do IEEE, os autores comprovam a eficiência na determinação dos grupos coerentes e na construção da dinâmica equivalente do sistema de potência. Em El-arini e Fathy (2010a) os estudos referentes ao algoritmo Fuzzy são agora efetuados no modelo de sistema IEEE de 30 barras/6 geradores, e em El-arini e Fathy (2011) são repetidos para os modelos de sistemas IEEE de 68 barras/16 geradores e de 118 barras/20 geradores.

Os autores consideram, para a primeira técnica proposta, um modelo simplificado do sistema elétrico, considerando uma redução estática para se isolar os nós dos geradores. Importante observar que, o modelo sugerido parte do modelo utilizado em estudos de dinâmica de sistemas de potência, o qual requer pequena quantidade de dados e apresenta as seguintes premissas: potência mecânica de entrada constante, potência assíncrona desprezível, modelo de tensão constante sobre reatância transitória, o ângulo mecânico do rotor do gerador coincide com o ângulo da tensão na reatância transitória e as cargas são modeladas por impedâncias passivas.

Conforme o artigo, o algoritmo proposto, para a primeira técnica, baseia-se em seis critérios de coerência:

ISE δ - Integral do quadrado da diferença do ângulo do rotor

ISE ω - Integral do quadrado da diferença da velocidade do rotor

IAE δ - Integral da magnitude absoluta da diferença do ângulo do rotor

IAE ω - Integral da magnitude absoluta da diferença da velocidade do rotor

MAE δ - O máximo da magnitude absoluta da diferença do ângulo do rotor

MAE ω - O máximo da magnitude absoluta da diferença da velocidade do rotor

Os valores obtidos para estes seis índices são, então, ordenados em ordem crescente.

Um par de geradores (i, j) no sistema externo é considerado coerente se o mesmo satisfaz a condição:

$$S_i \leq \varepsilon_i, i = 1, 2, \dots, 6 \quad (1)$$

Onde ε_i é a tolerância desejada para cada critério de coerência proposto.

A segunda técnica do método baseia-se na identificação dos grupos de geradores coerentes através do uso do algoritmo de classificação Fuzzy C-Means (FCM). O algoritmo FCM é um método de classificação em conjuntos que permite associar um elemento como sendo pertencente a dois ou mais clusters (conjuntos).

Nesta segunda técnica, as medidas de coerência são derivadas dos índices ISE δ e ISE ω de forma a caracterizarem as relações entre qualquer par de geradores, sendo estes índices posteriormente utilizados como valores iniciais na matriz de pertinência do algoritmo FCM. O algoritmo FCM identifica os conjuntos de geradores coerentes e os geradores de cada um destes conjuntos.

Os centros (centróides) de cada conjunto são utilizados como geradores equivalentes, que representam a agregação dos geradores de cada um dos grupos considerados. Adicionalmente, os autores definem os cálculos da potência mecânica, da constante de inércia e do coeficiente de amortecimento destes geradores equivalentes. Um modelo equivalente para as linhas de transmissão também é apresentado, considerando os geradores equivalentes obtidos no FCM, resultando em uma matriz reduzida de admitância de barras.

A utilização dos geradores equivalentes juntamente com o modelo de linhas proposto permite obter-se um sistema reduzido equivalente ao SEP originalmente considerado. Os algoritmos e índices propostos foram testados e validados com os modelos de sistemas IEEE: 14 barras/5 geradores, 30 barras/6 geradores, 68 barras/16 geradores e 118 barras/20 geradores. Os resultados obtidos mostram que

os grupos de geradores coerentes são dependentes do tipo e localização da falta simulada no SEP, sendo o método proposto efetivo na determinação destes grupos de geradores coerentes e na construção do equivalente dinâmico do SEP.

A identificação de grupos de geradores coerentes também é efetuada por Wang e Huang (2005) utilizando o algoritmo Fuzzy C-Means. Nesta proposta os autores definem uma medida (métrica) de coerência baseada nas respostas dinâmicas dos geradores (curvas swing), e a partir destas medidas, é construída uma matriz de relacionamento Fuzzy, descrevendo o grau de coerência entre qualquer par de geradores considerados. A metodologia envolve o levantamento das curvas de resposta de cada gerador durante transientes e o processamento destas respostas por um algoritmo de classificação, no sentido de se obter os grupos de coerência.

Uma abordagem, para agregação de geradores, baseada na distribuição (participação) dos mesmos em partes fictícias de agregação é descrita por Lino; Fette e Dong (2005). Esta abordagem é utilizada como base para a geração de modelos dinâmicos de mais baixa ordem que caracterizam o comportamento eletromecânico da área externa do sistema em estudo. A área externa é definida como aquela que será reduzida para um modelo simplificado, com a proposição de um equivalente dinâmico de geradores e controladores, tendo suas propriedades preservadas.

A abordagem de agregação está baseada na estratégia de divisão da participação de cada gerador na composição da resposta da área externa no domínio do tempo.

O impacto de cada gerador, da área externa, no comportamento dinâmico do sistema é subdividido em várias partes, que representam sua influência de acordo com uma atribuição de participação nos equivalentes dinâmicos, determinada pelo uso de Lógica Fuzzy. O processo convencional de agregação de geradores envolve a avaliação da coerência de fase do ângulo do rotor dos geradores para gerar os modelos equivalentes, enquanto que no processo proposto pelos autores, todos os geradores da área externa têm uma participação em todos os geradores fictícios, cuja intensidade é definida pela sua condição de distribuição.

Com a utilização do classificador Fuzzy são obtidos os coeficientes de pertinência, de cada gerador, que definem a sua participação em todas as classes (conjuntos), mas com diferentes graus de participação de acordo com sua similaridade com os demais geradores de cada classe.

Os coeficientes de pertinência são utilizados para definir o grau de participação de cada gerador na composição de cada um dos vários geradores fictícios. O método foi testado em um sistema composto por 16 geradores e seus sistemas de excitação. O sistema foi dividido em duas áreas, sendo a área C mantida como área de estudo, com todos os seus geradores considerados individualmente, figura 5.

Os demais geradores foram considerados da área externa, sendo, portanto objetos do processo de agregação proposto, assim como do processo tradicional de agregação. Foram simulados diversos curtos trifásicos, com duração entre 80 e 200 ms, ocorrendo na área C.

Figura 5 - Sistema de 16 geradores

Fonte: Lino; Fette e Dong (2005)

Os resultados do método proposto são comparados com os resultados obtidos pela simulação do sistema completo original, pelo método de agregação convencional e pela classificação de padrões eletromecânicos, efetuada pelo método K-Means.

Observa-se, conforme os autores, uma aderência considerável dos valores obtidos para a fase e amplitude dos geradores equivalentes e individualizados das várias abordagens.

O algoritmo de classificação Fuzzy C-Medoid é utilizado, em Kamwa et al. (2009), numa abordagem de classificação objetivando a segregação de um grande sistema elétrico de potência em áreas elétricas centradas em algumas barras representativas denominadas, pelos autores, de barras Medoids.

O método proposto é testado em um grande sistema elétrico de potência real, da Hydro-Québec, objetivando considerar características mais realistas em termos de aspectos geográficos e de dinâmica deste sistema.

Conforme os autores, o método proposto é do tipo reconhecimento de coerência baseado em medições. Ressaltam que este tipo de abordagem seria a mais adequada para um ambiente on-line de controle de segurança, utilizando WAMS.

Foram efetuados testes nas barras de 735 KV e também nas barras com tensão abaixo de 120KV.

O método, quando utilizado off-line, pode utilizar os resultados de simulações, lineares e não lineares no domínio do tempo, de ocorrências de contingências selecionadas, de forma a extrair as informações para a determinação dos agrupamentos de barras. Existe também a possibilidade de generalização desta abordagem no sentido estatístico ou probabilístico, de forma a incluir simulações de várias topologias, contingências e parâmetros de sistema nos cálculos de coerência.

No escopo do trabalho foram definidos três índices de coerência sob distúrbios (matriz de coerência angular, matriz de coerência de tensão e matriz de coerência probabilística off-line), além do desenvolvimento de um novo método recursivo para

a determinação on-line da matriz de coerência do sistema a partir de medições instantâneas de fasores (PMU).

Foi ressaltado ainda que, a atualização on-line dos conjuntos coerentes poderia ser útil para uso em funções de Monitoramento e Controle de Áreas Amplas (WAMC) e registrada também a implementação de uma aplicação de classificação de severidade de contingências e avaliação de segurança dinâmica, envolvendo a definição e cálculo dos índices de vulnerabilidade dinâmica, baseados na magnitude e no ângulo dos fasores de tensão das barras Medoids, obtidas pelo algoritmo proposto.

3.2 Redes Neurais para análise do SEP

Uma das características que tornam as redes neurais muito utilizadas em estudos do SEP é a sua capacidade de capturar (aprender) as características não lineares dos fenômenos observados, e isto sem a necessidade do uso de procedimentos iterativos (Zhou; Annakkage e Rajapakse (2010)).

Em Zhang et al. (2013), uma rede neural é utilizada para imitar o processo de um fluxo de potência continuado, para fins de previsão da margem de estabilidade de tensão. A rede neural utiliza como entradas parâmetros do sistema de potência, tais como potência ativa e reativa, tanto das cargas como dos geradores, módulo e ângulo das tensões, além da informação de sentido de fluxos nas linhas. O processo de aprendizado da rede neural adotado foi o “extreme learning machine” – ELM, o qual apresenta, por sua performance, um menor tempo de treinamento da rede. A rede neural foi aplicada no sistema IEEE 118-bus, com a carga variada de forma randômica, dentro do intervalo de 80% a 120% do caso base. Os baixos erros apresentados validam o uso desta abordagem.

Pode-se observar em Sajan; Tyagi e Kumar (2014), um método para a determinação de índice de margem de estabilidade de tensão, utilizando as medições de módulo e ângulo de fase das tensões do sistema de potência. Utilizam uma combinação de algoritmo genético e redes neurais para monitoração online da estabilidade de tensão de longo prazo, o qual foi testado com o sistema New England IEEE 39-bus.

O cálculo convencional da margem de estabilidade considera a execução do fluxo de potência continuado, para se levantar os dados para se construir a curva PV. O trabalho propõe substituir o fluxo de potência continuado, os cálculos das margens de estabilidade local e do sistema de potência, pelo conjunto híbrido algoritmo genético e rede neural.

As entradas para este conjunto são o módulo e o ângulo de fase da tensão e são consideradas como se fossem originadas de PMUS instaladas no sistema em estudo.

A maior vantagem desta abordagem seria evitar o tradicional procedimento iterativo para determinação do índice de margem de estabilidade de tensão, permitindo o seu uso online.

As potências ativas e reativas nas barras de carga foram variadas de forma aleatória com um aumento de 30%.

Nesta solução os meta-parâmetros (número de neurônios na camada oculta, funções de ativação das camadas de entrada e de saída e a taxa de aprendizado), da rede neural são otimizados pelo algoritmo genético.

Os resultados mostram a eficácia do método proposto e que, devido à rapidez no seu processamento, o mesmo poderia ser utilizado para monitoramento de estabilidade em tempo real.

Zhou; Annakkage e Rajapakse (2010) propõem um método para monitorar, de modo online, a margem de estabilidade de tensão utilizando redes neurais. Neste trabalho a rede neural substitui o processo de fluxo de potência continuado no cálculo de estimação da margem de potência. Um diferencial do método apresentado está na utilização de apenas uma rede neural para todas as contingências consideradas, neste caso contingências simples de linha.

Ressaltam a importância da adequada escolha das variáveis a serem consideradas como entradas da rede neural, e para esta escolha, foram testadas várias combinações das quatro variáveis de entrada: módulo de tensão, injeções de potência reativa e ativa, módulo de tensão e potência reativa e por fim, módulos e ângulos de tensão.

Também foi avaliada a situação de medições com erros, obtendo-se resultados que indicam que a rede neural fornece a informação correta, mesmo na presença de erro nas informações de entrada da mesma. Outro produto do método é a determinação do posicionamento ótimo para instalação de PMUs de forma a atender adequadamente às necessidades do monitoramento da estabilidade de tensão. A proposta foi testada com o sistema New England IEEE 39-bus, além de um sistema de potência real.

A identificação de coerência dinâmica de geradores oscilantes é proposta por Wilfert; Voithlander e Erlich (2001), com a utilização de mapas de Kohonen para efetuar a classificação das respostas temporais de geradores sujeitos a contingências de rede. São considerados dois modos para se determinar o comportamento dinâmico dos geradores: análise modal da matriz de sistema do SEP linearizado e a resposta no tempo do movimento dos rotores após falta (contingência).

A análise modal parte de um modelo de segunda ordem contendo apenas as variáveis do movimento mecânico (potência sincronizante, velocidade síncrona de rotor e constantes de inércia dos geradores), desconsiderando amortecimento eletromagnético e influências dos controladores existentes.

Utilizou-se um SEP 220/113KV com 28 geradores e um mapa de Kohonen de 4X4 neurônios como exemplo de demonstração. Conforme os autores, com a abordagem modal, confirma-se o resultado esperado que geradores com tamanhos semelhantes e com forte acoplamento elétrico são classificados no mesmo grupo.

A segunda abordagem dos autores é voltada para a análise de componentes principais da resposta temporal do movimento dos rotores após faltas simuladas. A

partir dos resultados desta análise, aplicada na matriz de correlação das respostas temporais dos geradores, são definidos os vetores de dados de entrada para o mapa de Kohonen. Observa-se que estes vetores de entrada apresentam uma redução de dimensionalidade resultante da análise efetuada.

Uma questão levantada é a qualidade dos dois processos de classificação. Para isso, é proposta uma medida de qualidade, baseada na avaliação de quão bem um determinado gerador classificado em um conjunto (cluster) pode ser representado pelo centro (centróide) deste cluster. O critério de associação é definido como sendo $m = (1 - d/2) \times 100\%$. Onde d é a distância entre o vetor de entrada (normalizado para 1) e o centro do cluster no qual foi classificado.

Os autores apontam a seleção adequada dos vetores de entrada (informação e quantidade) como fator essencial para a eficiência do método de classificação; quanto menor a dimensão dos vetores de entrada, mais eficiente resulta o processo de classificação.

Ressaltam que o método modal resulta em maior número de clusters (14 clusteres) que o método de componentes principais (7 clusteres), devido ao fato de o segundo ao tratar com respostas no tempo, inclui melhores considerações físicas da dinâmica dos geradores e ações dos diversos controladores. Concluem que o uso de mapas auto-organizáveis para análise de coerência e classificação de geradores do SEP é adequado para a tarefa de elaboração de um modelo dinâmico de rede equivalente, com menor ordem dimensional.

O método de componentes principais foi também testado em um SEP de grande porte, com 244 geradores. A classificação resultante, após a aplicação de 3 faltas, apresentou 30 clusters; tendo sido validada por uma posterior avaliação de engenharia.

Nizam (2010) apresenta um método de se proceder à classificação de barras em conjuntos de barras com comportamento semelhantes, quando na ocorrência de contingências.

O trabalho apresenta a aplicação de redes de Kohonen para efetuar a classificação de barras do sistema elétrico em conjuntos de barras que apresentam um comportamento semelhante quando o sistema elétrico é submetido a contingências (perda de uma linha de transmissão e excesso de carga levando ao colapso de tensão). O comportamento das barras é verificado em relação às variações de potência ativa e reativa, de tensão e de ângulo de tensão durante as ocorrências de contingências.

O objetivo desta classificação é a redução da complexidade do sistema elétrico, ao ser utilizar os conjuntos obtidos na classificação no lugar das barras individuais para processo de controle de tensão. Com isso ter-se-ia uma redução do efeito computacional do cálculo da estabilidade de tensão.

Os resultados obtidos são comparados com o método LVQ- Learning Vector Quantization, donde se conclui que o método proposto apresenta resultados equivalentes ao LVQ, sendo, portanto uma ferramenta, que por efetuar a classificação das barras, permite uma redução do tamanho do sistema elétrico considerado. Esta redução implica em um menor número de barras a serem consideradas em processos de controle de tensão e, portanto em menor carga computacional.

Nos métodos aqui relacionados, observa-se a necessidade de utilização de parâmetros dos modelos dos equipamentos constituintes do sistema elétrico de potência. Estes parâmetros foram utilizados como entradas de redes neurais, como subsídios para determinação de parâmetros agregados e para processamento Fuzzy:

- Ângulo de rotor de gerador
- Potência mecânica de entrada do gerador
- Potência elétrica de saída do gerador
- Coeficiente de inércia do gerador
- Indutância e resistência dos geradores
- Matriz de admitância

O método proposto nesta tese não considera nenhum parâmetro, modelos de equipamentos ou mesmo modelos dinâmicos do sistema elétrico de potência e procura obter um relacionamento, um comportamento, entre conjuntos de barras coerentes em tensão que possa fornecer informação sobre a estabilidade de tensão deste sistema.

Um exemplo de uma abordagem buscando uma relação de comportamento, neste caso, a relação entre um conjunto de linhas de transmissão críticas em um sistema de potência e a sua condição de estabilidade de operação, pode ser observado em (Cao; Chen e Aihara (2015)).

Neste trabalho, os autores, propõem um método de avaliação qualitativa da estabilidade de tensão em sistemas de potência. O mesmo se baseia na afirmação, comprovada no trabalho, de que o fluxo de potência ativa em uma linha de transmissão é uma função contínua dos parâmetros da bifurcação (instabilidade), dentro do intervalo de seu valor inicial até o valor do ponto de bifurcação. Acrescenta ainda que os fluxos apresentam seu máximo valor para valores de parâmetros de bifurcação dentro desta faixa considerada.

Ou seja, observa-se uma sequência de linhas cujos fluxos de potência ativa atingem um máximo quando o parâmetro de bifurcação é igual a um valor intermediário dentro do intervalo anteriormente citado. Estas linhas são denominadas linhas críticas, e a presença de uma sequência de linhas deste tipo sinaliza uma condição de um iminente colapso de tensão.

A ocorrência de linhas críticas e a sua quantidade podem, então, fornecerem informações para uma avaliação e classificação qualitativas das condições de operação do sistema de potência em termos de estabilidade de tensão. O método foi aplicado aos sistemas IEEE 57-Bus e IEEE 118-Bus.

Um senão para a aderência, do método proposto, com o trabalho nesta tese é que Cao; Chen e Aihara (2015) utilizam a matriz Jacobiana do sistema em estudo, ou seja, necessitam do modelo do sistema de potência e seus parâmetros associados.

Bastos e Martini (2015) apresentam um trabalho, dentro de uma abordagem Model Free, para a determinação de barras coerentes em tensão. Utilizam, para tal, uma rede neural do tipo auto organizável, um Mapa de Kohonen, para a determinação do número adequado de conjuntos de barras coerentes, assim como também para efetuar a classificação das diversas barras do SEP dentro destes conjuntos obtidos.

O mapa de Kohonen é executado a partir de dados reais do Sistema de Transmissão de uma concessionária Paulista, produzindo uma classificação atualizada das barras em relação aos conjuntos resultantes deste ciclo Kohonen.

4 METODOLOGIA PROPOSTA

Algo só é impossível até que alguém duvide e acabe
provando o contrário

Albert Einstein

4.1 Considerações gerais

Na abordagem aqui adotada, buscou-se a determinação de um equivalente de ordem reduzida do sistema completo em estudo, caracterizado por conjuntos variáveis de barras coerentes, obtidos por processamento Fuzzy, definindo seu comportamento dinâmico. Nesta abordagem, o sistema elétrico em estudo fica caracterizado pelo conjunto no qual ele está classificado no instante considerado. O sistema elétrico fica representado por um vetor contendo todas as barras constituintes deste sistema.

A validação da metodologia foi efetuada com o uso de simulações no sistema de barras IEEE 39-Bus.

Este sistema foi simulado, através do aplicativo PS Simul, para se obter o seu comportamento em situações normais de operação e em condições de contingências.

As informações geradas são utilizadas para aplicação da metodologia proposta, a qual procederá à classificação, por meio de Lógica Fuzzy, das barras em clusters conforme similaridades detectadas em seus comportamentos, seguida da extração das “assinaturas”.

Aqui são apresentadas a metodologia proposta e a sua aplicação com os resultados das simulações do sistema IEEE 39-Bus.

Para a realização dos testes de aplicação e validação da metodologia, foi utilizado um computador portátil, marca Dell, modelo Precision M6500, com processador Intel i7 Quad Core, 8Gb RAM, 1.6GHz, utilizando Windows 7 - 64 bits.

4.2 Metodologia - PRECEPTOR

A estrutura geral da metodologia proposta (aqui denominada Preceptor) é apresentada na figura 6, na qual se pode observar, de forma macro, o fluxo de informações e o tratamento efetuado em cada fase do processamento.

O Preceptor trabalha com informações aquiritadas diretamente do processo elétrico, ou mesmo dados históricos, efetuando as ações de classificação, e a apresentação contextual dos resultados obtidos.

Figura 6 - Arquitetura do Preceptor

Fonte: o autor

Hierarquicamente, o Preceptor, pode ser dividido em Classificador, Identificador de “Assinaturas” e Indicador situacional.

A partir dos dados obtidos, o Preceptor efetua a sua classificação em conjuntos baseando-se em similaridades de tensão, buscando desta forma identificar e agrupar as barras com comportamento de tensão similar, apresentando, portanto, a coerência de tensão.

O comportamento de qualquer uma das barras, que compõe um conjunto coerente, pode ser representado pelo comportamento do próprio conjunto, é como se fosse uma só barra equivalente às todas as participantes daquele conjunto em um instante considerado, que nesta abordagem representa o sistema elétrico como um todo.

Na sequência, a evolução do comportamento das barras em relação aos conjuntos obtidos é avaliada, buscando-se obter padrões que possam ser correlacionados com a condição de estabilidade do sistema de potência. Estes padrões são as “assinaturas” do sistema em estudo, figura 7.

Figura 7 - Preceptor

Fonte: o autor

4.3 Modelos IEEE

Um dos modelos IEEE foi utilizado na fase de concepção do Preceptor, para os procedimentos de classificação, extração de regras e identificação das assinaturas.

Usando-se o aplicativo PS Simul, o sistema IEEE 39-Bus foi simulado, considerando-se uma relação de contingências (faltas e carregamentos). Os resultados desta simulação, especificamente os valores de tensão de cada uma das barras, são utilizados no Preceptor para processamento na busca da informação de estabilidade do sistema de potência.

4.3.1 Sistema IEEE 39-Bus

O sistema IEEE 39-Bus, também conhecido como sistema New England é constituído por 39 barras, 10 geradores e 12 transformadores, conforme figura 8.

Neste sistema, o Gerador 10 representa um modelo agregado equivalente para uma parte da rede sobre a qual não se tem controle.

Os geradores de 1 a 9 são equipados com Estabilizadores de Sistema de Potência (PSSs), que fornecem um bom amortecimento dos modos locais e estabilizam o sistema de malha aberta instável.

Figura 8 – IEEE 39-Bus

Fonte: <http://icseg.itl.illinois.edu/files/2013/10/IEEE39.png>

Os parâmetros deste sistema podem ser observados nas tabelas 1 e 2. Maiores detalhes podem ser obtidos no Anexo A.

Tabela 1 – Dados do circuito CA

Barra DE	Barra PARA	Nº do circuito	Resistência (%)	Reatância (%)	Susceptância (Mvar)
1	2	1	0,35	4,11	69,9
1	39	1	0,10	2,50	75,0
2	3	1	0,13	1,51	25,7
2	25	1	0,70	0,86	14,6
3	4	1	0,13	2,13	22,1
3	18	1	0,11	1,33	21,4
4	5	1	0,08	1,28	13,4
4	14	1	0,08	1,29	13,8
5	6	1	0,02	0,26	4,3
5	8	1	0,08	1,12	14,8
6	7	1	0,06	0,92	11,3
6	11	1	0,07	0,82	13,9
7	8	1	0,04	0,46	7,8
8	9	1	0,23	3,63	38,0
9	39	1	0,10	2,50	120,0
10	11	1	0,04	0,43	7,3
10	13	1	0,04	0,43	7,3
13	14	1	0,09	1,01	17,2
14	15	1	0,18	2,17	36,6
15	16	1	0,09	0,94	17,1
16	17	1	0,07	0,89	13,4
16	19	1	0,16	1,95	30,4
16	21	1	0,08	1,35	25,5
16	24	1	0,03	0,59	6,8
17	18	1	0,07	0,82	13,2
17	27	1	0,13	1,73	32,2
21	22	1	0,08	1,40	25,7
22	23	1	0,06	0,96	18,5
23	24	1	0,22	3,50	36,1
25	26	1	0,32	3,23	51,3
26	27	1	0,14	1,47	24,0
26	28	1	0,43	4,74	78,0
26	29	1	0,57	6,25	102,9
28	29	1	0,14	1,51	24,9

Fonte: Gavilan (2016)

Tabela 2 – Dados dos transformadores

Barra DE	Barra PARA	Nº do circuito	Resistência (%)	Reatância (%)	Tape
2	30	1	0,00	1,81	1,025
6	31	1	0,00	2,50	1,070
10	32	1	0,00	2,00	1,070
11	12	1	0,16	4,35	1,006
12	13	1	0,16	4,35	1,006
19	20	1	0,07	1,38	1,060
19	33	1	0,07	1,42	1,070
20	34	1	0,09	1,80	1,009
22	35	1	0,00	1,43	1,025
23	36	1	0,05	2,72	1,000
25	37	1	0,06	2,32	1,025
29	38	1	0,08	1,56	1,025

Fonte: Gavilan (2016)

4.4 Algoritmo Fuzzy Isodata

O algoritmo de classificação Fuzzy utilizado foi o Fuzzy ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis) em uma implementação em Visual Basic, desenvolvida pelo autor desta Tese.

Este algoritmo objetiva encontrar partições Fuzzy, a partir de um conjunto de dados de treinamento, através de uma generalização Fuzzy da função de mínimos quadráticos, não sendo formuladas regras do tipo *if then*, uma vez que a nebulosidade está intrínseca nas restrições impostas na otimização desta função objetivo.

Consiste na minimização de uma função Objetivo (Fuzzy) de modo a organizar um conjunto de N objetos, de dimensão p, em subconjuntos, denominados clusters, de tal modo que os objetos em um mesmo subconjunto sejam semelhantes entre si, mas sejam diferentes, em algum grau, de outros objetos pertencentes a outros clusters.

Baseia-se na medida de similaridade de modo a caracterizar o grau de semelhança entre objetos (expressando, portanto, a qualidade da partição).

A função objetivo é expressa por:

$$J_m(U; Y) = \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^c (u_{jk})^m E_j(x_k)$$

Onde:

$X = \{x_k \mid k \in [1; n]\}$ conjunto de treinamento, contendo n amostras não classificadas

$Y = \{y_j \mid j \in [1; c]\}$ conjunto contendo os centros dos clusters

$E_j(x_k)$ medida de dissimilaridade (distorção) entre a amostra x_k e o centro y_j do cluster j especificado. Pode ser usada
 $E_j(x_k) = ||x_k - y_j||^2$ (distância Euclidiana)

$U = [u_{jk}]$ matriz, c x n, de partições fuzzy c-partition, contendo os valores de pertinência de todas as amostras em relação a todos os clusters

$m \in (1; \infty)$ parâmetro que controla o grau de nebulosidade (fuzziness)

A minimização da função J_m , sob a restrição probabilística

$$\sum_{j=1}^c (u_{jk}) = 1$$

pode ser efetuada com a fórmula:

$$y_j = \frac{\sum_{k=1}^n (u_{jk})^m \cdot x_k}{\sum_{k=1}^n (u_{jk})^m}$$

e

$$u_{jk} = \left(\sum_{l=1}^c \left(\frac{E_l(x_k)}{E_j(x_k)} \right)^{\frac{2}{m-1}} \right)^{-1} \quad \text{para } E_j(x_k) > 0$$

$$u_{jk} = 1, \quad \text{para } E_j(x_k) = 0$$

Algoritmo Fuzzy

1. Escolha o número de classes C e o grau de nebulosidade m.
2. Calcule a Matriz Fuzzy de Partição U(j) para a iteração j-ésima
3. Atualize os centros das Partições Y(j) para a iteração j-ésima, usando U(j)
4. Se $\| U(j+1) - U(j) \| > \xi$ faça $j=j+1$ e volte ao passo 2

4.5 Simulações

O trabalho desenvolvido utilizou, como subsidio, os resultados de simulações efetuadas no aplicativo Software PS Simul – Power System Simulator da empresa Conprove Engenharia e Comércio, contemplando simulações de 300 casos de estudo no sistema 39 barras IEEE – New England.

Os casos contemplando uma combinação de alterações de carga e de faltas aplicadas nos sistema IEEE 39-Bus, conforme descrito na sequência, foram utilizados para a elaboração da metodologia e sua posterior validação.

Os acréscimos de carga, aplicados nos casos em estudo, apesar de não constituírem valores encontrados em sistemas de potência reais, foram assim considerados para se obter situações de instabilidades de uma forma mais rápida,

permitindo obter um menor tempo de simulação, reduzindo desta forma a quantidade de informações a serem tratadas pelo algoritmo da metodologia proposta. Ressalta-se que esta abordagem não apresenta perda de generalidade da metodologia proposta, constituindo apenas uma facilidade de observação dando maior foco ao fenômeno de instabilidade.

Nos casos de 1 a 100, foram aplicadas faltas individuais nas barras, nos instantes especificados, conforme tabela 3. As faltas aplicadas têm seus tipos e durações também apresentados na tabela.

Tabela 3 – Descrição dos casos de 1 a 100

DESCRIÇÃO DAS FALTAS APLICADAS (INDIVIDUAIS)				
CASO	BARRA	INSTANTE (s)	TIPO	DURAÇÃO (ms)
1	B2	0,5	A-T	100
2	B2	0,5	A-B	100
3	B2	0,5	A-B-T	100
4	B2	0,5	A-B-C	100
5	B2	0,5	A-B-C-T	100
6	B2	0,5	B-T	500
7	B2	0,5	B-C	500
8	B2	0,5	B-C-T	500
9	B2	0,5	A-B-C	500
10	B2	0,5	A-B-C-T	500
11	B6	0,5	C-T	100
12	B6	0,5	A-C	100
13	B6	0,5	A-C-T	100
14	B6	0,5	A-B-C	100
15	B6	0,5	A-B-C-T	100
16	B6	0,5	A-T	500
17	B6	0,5	A-B	500
18	B6	0,5	A-B-T	500
19	B6	0,5	A-B-C	500
20	B6	0,5	A-B-C-T	500
21	B8	0,5	B-T	100
22	B8	0,5	B-C	100
23	B8	0,5	B-C-T	100
24	B8	0,5	A-B-C	100
25	B8	0,5	A-B-C-T	100
26	B8	0,5	C-T	500
27	B8	0,5	A-C	500

28	B8	0,5	A-C-T	500
29	B8	0,5	A-B-C	500
30	B8	0,5	A-B-C-T	500
31	B9	0,5	A-T	100
32	B9	0,5	A-B	100
33	B9	0,5	A-B-T	100
34	B9	0,5	A-B-C	100
35	B9	0,5	A-B-C-T	100
36	B9	0,5	B-T	500
37	B9	0,5	B-C	500
38	B9	0,5	B-C-T	500
39	B9	0,5	A-B-C	500
40	B9	0,5	A-B-C-T	500
41	B10	0,5	C-T	100
42	B10	0,5	A-C	100
43	B10	0,5	A-C-T	100
44	B10	0,5	A-B-C	100
45	B10	0,5	A-B-C-T	100
46	B10	0,5	A-T	500
47	B10	0,5	A-B	500
48	B10	0,5	A-B-T	500
49	B10	0,5	A-B-C	500
50	B10	0,5	A-B-C-T	500
51	B19	0,5	B-T	100
52	B19	0,5	B-C	100
53	B19	0,5	B-C-T	100
54	B19	0,5	A-B-C	100
55	B19	0,5	A-B-C-T	100
56	B19	0,5	C-T	500
57	B19	0,5	A-C	500
58	B19	0,5	A-C-T	500
59	B19	0,5	A-B-C	500
60	B19	0,5	A-B-C-T	500
61	B20	0,5	A-T	100
62	B20	0,5	A-B	100
63	B20	0,5	A-B-T	100
64	B20	0,5	A-B-C	100
65	B20	0,5	A-B-C-T	100
66	B20	0,5	B-T	500
67	B20	0,5	B-C	500
68	B20	0,5	B-C-T	500
69	B20	0,5	A-B-C	500
70	B20	0,5	A-B-C-T	500
71	B23	0,5	C-T	100
72	B23	0,5	A-C	100

73	B23	0,5	A-C-T	100
74	B23	0,5	A-B-C	100
75	B23	0,5	A-B-C-T	100
76	B23	0,5	A-T	500
77	B23	0,5	A-B	500
78	B23	0,5	A-B-T	500
79	B23	0,5	A-B-C	500
80	B23	0,5	A-B-C-T	500
81	B25	0,5	B-T	100
82	B25	0,5	B-C	100
83	B25	0,5	B-C-T	100
84	B25	0,5	A-B-C	100
85	B25	0,5	A-B-C-T	100
86	B25	0,5	C-T	500
87	B25	0,5	A-C	500
88	B25	0,5	A-C-T	500
89	B25	0,5	A-B-C	500
90	B25	0,5	A-B-C-T	500
91	B29	0,5	A-T	100
92	B29	0,5	A-B	100
93	B29	0,5	A-B-T	100
94	B29	0,5	A-B-C	100
95	B29	0,5	A-B-C-T	100
96	B29	0,5	B-T	500
97	B29	0,5	B-C	500
98	B29	0,5	B-C-T	500
99	B29	0,5	A-B-C	500
100	B29	0,5	A-B-C-T	500

Fonte: o autor

Para casos de 101 a 180, tabela 4, foram aplicadas faltas individuais evolutivas nas barras e instantes especificados. A especificação do instante e tipo de falta contém dois parâmetros (P1 --> P2). O parâmetro P1 se refere ao instante e tipo de inicialização da falta, o parâmetro P2 se refere ao instante de evolução da falta e para qual tipo a falta evolui.

A duração também é especificada por dois parâmetros que significam o primeiro quanto tempo a falta se mantém no primeiro tipo e o segundo, quanto tempo a falta se mantém no sistema após sua evolução.

Tabela 4 Descrição dos casos de 101 a 180

DESCRIÇÃO DAS FALTAS APLICADAS (INDIVIDUAIS EVOLUTIVAS)				
CASO	BARRA	INSTANTE (s)	TIPO	DURAÇÃO (ms)
101	B2	0,5 --> 0,6	A-T --> A-B	100 - 100
102	B2	0,5 --> 0,6	A-B --> A-B-C	100 - 100
103	B2	0,5 --> 0,6	A-B-T --> A-B-C-T	100 - 100
104	B2	0,5 --> 0,6	A-B-C --> A-B-C-T	100 - 100
105	B2	0,5 --> 0,75	B-T --> B-C	250 - 250
106	B2	0,5 --> 0,75	B-C --> A-B-C	250 - 250
107	B2	0,5 --> 0,75	B-C-T --> A-B-C-T	250 - 250
108	B2	0,5 --> 0,75	A-B-C --> A-B-C-T	250 - 250
109	B6	0,5 --> 0,6	C-T --> C-A	100 - 100
110	B6	0,5 --> 0,6	C-A --> A-B-C	100 - 100
111	B6	0,5 --> 0,6	C-A-T --> A-B-C-T	100 - 100
112	B6	0,5 --> 0,6	A-B-C --> A-B-C-T	100 - 100
113	B6	0,5 --> 0,75	A-T --> A-B	250 - 250
114	B6	0,5 --> 0,75	A-B --> A-B-C	250 - 250
115	B6	0,5 --> 0,75	A-B-T --> A-B-C-T	250 - 250
116	B6	0,5 --> 0,75	A-B-C --> A-B-C-T	250 - 250
117	B8	0,5 --> 0,6	B-T --> B-C	100 - 100
118	B8	0,5 --> 0,6	B-C --> A-B-C	100 - 100
119	B8	0,5 --> 0,6	B-C-T --> A-B-C-T	100 - 100
120	B8	0,5 --> 0,6	A-B-C --> A-B-C-T	100 - 100
121	B8	0,5 --> 0,75	C-T --> C-A	250 - 250
122	B8	0,5 --> 0,75	C-A --> A-B-C	250 - 250
123	B8	0,5 --> 0,75	C-A-T --> A-B-C-T	250 - 250
124	B8	0,5 --> 0,75	A-B-C --> A-B-C-T	250 - 250
125	B9	0,5 --> 0,6	A-T --> A-B	100 - 100
126	B9	0,5 --> 0,6	A-B --> A-B-C	100 - 100
127	B9	0,5 --> 0,6	A-B-T --> A-B-C-T	100 - 100
128	B9	0,5 --> 0,6	A-B-C --> A-B-C-T	100 - 100
129	B9	0,5 --> 0,75	B-T --> B-C	250 - 250
130	B9	0,5 --> 0,75	B-C --> A-B-C	250 - 250
131	B9	0,5 --> 0,75	B-C-T --> A-B-C-T	250 - 250
132	B9	0,5 --> 0,75	A-B-C --> A-B-C-T	250 - 250
133	B10	0,5 --> 0,6	C-T --> C-A	100 - 100
134	B10	0,5 --> 0,6	C-A --> A-B-C	100 - 100
135	B10	0,5 --> 0,6	C-A-T --> A-B-C-T	100 - 100
136	B10	0,5 --> 0,6	A-B-C --> A-B-C-T	100 - 100
137	B10	0,5 --> 0,75	A-T --> A-B	250 - 250
138	B10	0,5 --> 0,75	A-B --> A-B-C	250 - 250
139	B10	0,5 --> 0,75	A-B-T --> A-B-C-T	250 - 250
140	B10	0,5 --> 0,75	A-B-C --> A-B-C-T	250 - 250

141	B19	0,5 --> 0,6	B-T --> B-C	100 - 100
142	B19	0,5 --> 0,6	B-C --> A-B-C	100 - 100
143	B19	0,5 --> 0,6	B-C-T --> A-B-C-T	100 - 100
144	B19	0,5 --> 0,6	A-B-C --> A-B-C-T	100 - 100
145	B19	0,5 --> 0,75	C-T --> C-A	250 - 250
146	B19	0,5 --> 0,75	C-A --> A-B-C	250 - 250
147	B19	0,5 --> 0,75	C-A-T --> A-B-C-T	250 - 250
148	B19	0,5 --> 0,75	A-B-C --> A-B-C-T	250 - 250
149	B20	0,5 --> 0,6	A-T --> A-B	100 - 100
150	B20	0,5 --> 0,6	A-B --> A-B-C	100 - 100
151	B20	0,5 --> 0,6	A-B-T --> A-B-C-T	100 - 100
152	B20	0,5 --> 0,6	A-B-C --> A-B-C-T	100 - 100
153	B20	0,5 --> 0,75	B-T --> B-C	250 - 250
154	B20	0,5 --> 0,75	B-C --> A-B-C	250 - 250
155	B20	0,5 --> 0,75	B-C-T --> A-B-C-T	250 - 250
156	B20	0,5 --> 0,75	A-B-C --> A-B-C-T	250 - 250
157	B23	0,5 --> 0,6	C-T --> C-A	100 - 100
158	B23	0,5 --> 0,6	C-A --> A-B-C	100 - 100
159	B23	0,5 --> 0,6	C-A-T --> A-B-C-T	100 - 100
160	B23	0,5 --> 0,6	A-B-C --> A-B-C-T	100 - 100
161	B23	0,5 --> 0,75	A-T --> A-B	250 - 250
162	B23	0,5 --> 0,75	A-B --> A-B-C	250 - 250
163	B23	0,5 --> 0,75	A-B-T --> A-B-C-T	250 - 250
164	B23	0,5 --> 0,75	A-B-C --> A-B-C-T	250 - 250
165	B25	0,5 --> 0,6	B-T --> B-C	100 - 100
166	B25	0,5 --> 0,6	B-C --> A-B-C	100 - 100
167	B25	0,5 --> 0,6	B-C-T --> A-B-C-T	100 - 100
168	B25	0,5 --> 0,6	A-B-C --> A-B-C-T	100 - 100
169	B25	0,5 --> 0,75	C-T --> C-A	250 - 250
170	B25	0,5 --> 0,75	C-A --> A-B-C	250 - 250
171	B25	0,5 --> 0,75	C-A-T --> A-B-C-T	250 - 250
172	B25	0,5 --> 0,75	A-B-C --> A-B-C-T	250 - 250
173	B29	0,5 --> 0,6	A-T --> A-B	100 - 100
174	B29	0,5 --> 0,6	A-B --> A-B-C	100 - 100
175	B29	0,5 --> 0,6	A-B-T --> A-B-C-T	100 - 100
176	B29	0,5 --> 0,6	A-B-C --> A-B-C-T	100 - 100
177	B29	0,5 --> 0,75	B-T --> B-C	250 - 250
178	B29	0,5 --> 0,75	B-C --> A-B-C	250 - 250
179	B29	0,5 --> 0,75	B-C-T --> A-B-C-T	250 - 250
180	B29	0,5 --> 0,75	A-B-C --> A-B-C-T	250 - 250

Fonte: o autor

Os casos de 181 a 216, tabela 5, têm faltas simuladas em diferentes barras do sistema e com diferentes tipos, mas com seus instantes de início iguais.

O barramento da falta e seu tipo são especificados por dois parâmetros que significam as barras a serem aplicadas as faltas e quais serão seus respectivos tipos. A duração é a mesma para ambas as faltas aplicadas.

Tabela 5 – Descrição dos casos de 181 a 216

DESCRIÇÃO DAS FALTAS APLICADAS (SIMULTÂNEAS)				
CASO	BARRA	INSTANTE (s)	TIPO	DURAÇÃO (ms)
181	B2 / B1	0,5	A-T / A-B	100
182	B2 / B1	0,5	A-T / A-B-C	400
183	B2 / B3	0,5	A-B / A-B-C-T	100
184	B2 / B3	0,5	A-B-C / A-B-C-T	400
185	B3 / B4	0,5	B-T / A-B-C-T	100
186	B3 / B4	0,5	B-C / A-B-C	400
187	B6 / B5	0,5	C-T / C-A	100
188	B6 / B5	0,5	C-T / A-B-C	400
189	B6 / B7	0,5	C-A / A-B-C-T	100
190	B6 / B7	0,5	A-B-C / A-B-C-T	400
191	B8 / B9	0,5	A-T / A-B-C-T	100
192	B8 / B9	0,5	A-B / A-B-C	400
193	B6 / B11	0,5	B-T / B-C	100
194	B6 / B11	0,5	B-T / A-B-C	400
195	B9 / B1	0,5	B-C / A-B-C-T	100
196	B9 / B1	0,5	A-B-C / A-B-C-T	400
197	B13 / B14	0,5	C-T / A-B-C-T	100
198	B13 / B14	0,5	C-A / A-B-C	400
199	B10 / B11	0,5	A-T / A-B	100
200	B10 / B11	0,5	A-T / A-B-C	400
201	B10 / B13	0,5	A-B / A-B-C-T	100
202	B10 / B13	0,5	A-B-C / A-B-C-T	400
203	B19 / B16	0,5	B-T / A-B-C-T	100
204	B19 / B16	0,5	B-C / A-B-C	400
205	B19 / B20	0,5	C-T / C-A	100
206	B19 / B20	0,5	C-T / A-B-C	400
207	B22 / B21	0,5	C-A / A-B-C-T	100

208	B22 / B21	0,5	A-B-C / A-B-C-T	400
209	B23 / B22	0,5	A-T / A-B-C-T	100
210	B23 / B22	0,5	A-B / A-B-C	400
211	B25 / B26	0,5	B-T / B-C	100
212	B25 / B26	0,5	B-T / A-B-C	400
213	B29 / B28	0,5	B-C / A-B-C-T	100
214	B29 / B28	0,5	A-B-C / A-B-C-T	400
215	B26 / B28	0,5	C-T / A-B-C-T	100
216	B26 / B28	0,5	C-A / A-B-C	400

Fonte: o autor

Nos casos de 217 a 250, tabela 6, foram simuladas faltas em diferentes barras do sistema e com diferentes tipos, que tem seus instantes de início diferentes. O barramento da falta, seu tipo e instante de aplicação são especificados por dois parâmetros que significam as barras a serem aplicadas as faltas e quais serão seus respectivos tipos e instantes de aplicação.

A duração da falta é contada do chaveamento da segunda falta, ou seja, a primeira falta a entrar irá continuar no sistema até a segunda entrar somando-se ainda com o tempo de duração, enquanto a segunda se mantém no sistema apenas durante o tempo de duração.

Tabela 6 – Descrição dos casos de 217 a 250

DESCRIÇÃO DAS FALTAS APLICADAS (SEQUENCIAIS)				
CASO	BARRA	INSTANTE (s)	TIPO	DURAÇÃO (ms)
217	B2 / B1	0,5 / 0,6	A-T / A-B	100
218	B2 / B1	0,5 / 0,75	A-T / A-B-C	250
219	B2 / B3	0,5 / 0,6	A-B / A-B-C-T	100
220	B2 / B3	0,5 / 0,75	A-B-C / A-B-C-T	250
221	B3 / B4	0,5 / 0,6	B-T / A-B-C-T	100
222	B3 / B4	0,5 / 0,75	B-C / A-B-C	250
223	B6 / B5	0,5 / 0,6	C-T / C-A	100
224	B6 / B5	0,5 / 0,75	C-T / A-B-C	250
225	B6 / B7	0,5 / 0,6	C-A / A-B-C-T	100

226	B6 / B7	0,5 / 0,75	A-B-C / A-B-C-T	250
227	B8 / B9	0,5 / 0,6	A-T / A-B-C-T	100
228	B8 / B9	0,5 / 0,75	A-B / A-B-C	250
229	B6 / B11	0,5 / 0,6	B-T / B-C	100
230	B6 / B11	0,5 / 0,75	B-T / A-B-C	250
231	B9 / B1	0,5 / 0,6	B-C / A-B-C-T	100
232	B9 / B1	0,5 / 0,75	A-B-C / A-B-C-T	250
233	B13 / B14	0,5 / 0,6	C-T / A-B-C-T	100
234	B13 / B14	0,5 / 0,75	C-A / A-B-C	250
235	B10 / B11	0,5 / 0,6	A-T / A-B	100
236	B10 / B11	0,5 / 0,75	A-T / A-B-C	250
237	B10 / B13	0,5 / 0,6	A-B / A-B-C-T	100
238	B10 / B13	0,5 / 0,75	A-B-C / A-B-C-T	250
239	B19 / B16	0,5 / 0,6	B-T / A-B-C-T	100
240	B19 / B16	0,5 / 0,75	B-C / A-B-C	250
241	B19 / B20	0,5 / 0,6	C-T / C-A	100
242	B19 / B20	0,5 / 0,75	C-T / A-B-C	250
243	B22 / B21	0,5 / 0,6	C-A / A-B-C-T	100
244	B22 / B21	0,5 / 0,75	A-B-C / A-B-C-T	250
245	B23 / B22	0,5 / 0,6	A-T / A-B-C-T	100
246	B23 / B22	0,5 / 0,75	A-B / A-B-C	250
247	B25 / B26	0,5 / 0,6	B-T / B-C	100
248	B25 / B26	0,5 / 0,75	B-T / A-B-C	250
249	B29 / B28	0,5 / 0,6	B-C / A-B-C-T	100
250	B29 / B28	0,5 / 0,75	A-B-C / A-B-C-T	250

Fonte: o autor

Para a simulação dos casos de 251 a 300, as cargas do sistema foram divididas em 6 grupos (G1, G2, G3, G4, G5, G6). As barras de cargas que compõem cada grupo foram divididas da seguinte maneira, conforme tabela 7:

Tabela 7 – Grupos de barras

G1	B24 - B27 - B28 - B29
G2	B18 - B25 - B26
G3	B3 - B4 - B39
G4	B7 - B8 - B31
G5	B12 - B20 - B23
G6	B15 - B16 - B21

Fonte: o autor

Feita tal divisão, foram simulados cenários de variação de carregamento do sistema por grupo, conforme tabela 8. A disposição dos instantes de chaveamento foi colocada na mesma ordem em que as barras dos grupos estão dispostas acima.

A coluna de porcentagem nominal se refere ao valor das cargas que serão inseridas em cada barra, sendo que a carga a ser inserida terá a porcentagem de carga especificada em relação à carga que já está conectada ao barramento.

A aplicação de faltas também foi realizada nas barras e instantes especificados. Para fins de exemplificação, suponha a simulação do caso 1.

Neste caso, 50% do valor nominal das cargas que estão nas barras B24, B27, B28 e B29 serão inseridas no sistema nos instantes de 0,5 s, 1,5 s, 2,5 s e 3,5 s, respectivamente.

A diferença deste caso 1 para o caso 2 é que no segundo haverá também a aplicação de uma falta do tipo A-T na barra B24 no instante 0,5 s.

Tabela 8 – Casos 251 a 300 - Carregamento das barras

DESCRIÇÃO VARIAÇÕES DE CARREGAMENTO (Com e Sem Falhas)							
CASO	GRUPO	INSTANTE CHAV. (s)	% NOMINAL	BARRA EM FALTA	INSTANTE FALTA (s)	TIPO FALTA	DURAÇÃO (ms)
251	G1	0,5 - 1,5 - 2,5 - 3,5	50	---	---	---	---
252		0,5 - 1,5 - 2,5 - 3,5	50	B24	0,5	A-T	200
253		0,5 - 1,5 - 2,5 - 3,5	100	---	---	---	---
254		0,5 - 1,5 - 2,5 - 3,5	100	B27	1,5	A-B	200
255		0,5 - 1,5 - 2,5 - 3,5	400	---	---	---	---
256		0,5 - 1,5 - 2,5 - 3,5	400	B28	2,5	A-B-T	200
257		0,5 - 1,5 - 2,5 - 3,5	600	---	---	---	---
258		0,5 - 1,5 - 2,5 - 3,5	600	B29	3,5	A-B-C	200
259	G2	0,5 - 1,5 - 2,5	50	---	---	---	---
260		0,5 - 1,5 - 2,5	50	B25	0,5	B-T	200
261		0,5 - 1,5 - 2,5	100	---	---	---	---
262		0,5 - 1,5 - 2,5	100	B26	1,5	B-C	200
263		0,5 - 1,5 - 2,5	400	---	---	---	---
264		0,5 - 1,5 - 2,5	400	B18	2,5	B-C-T	200
265		0,5 - 1,5 - 2,5	600	---	---	---	---
266		0,5 - 1,5 - 2,5	600	B25	0,5	A-B-C	200
267	G3	0,5 - 1,5 - 2,5	50	---	---	---	---
268		0,5 - 1,5 - 2,5	50	B3	0,5	C-T	200
269		0,5 - 1,5 - 2,5	100	---	---	---	---
270		0,5 - 1,5 - 2,5	100	B4	1,5	A-C	200
271		0,5 - 1,5 - 2,5	400	---	---	---	---
272		0,5 - 1,5 - 2,5	500	---	---	---	---
273		0,5 - 1,5 - 2,5	600	---	---	---	---
274		0,5 - 1,5 - 2,5	600	B3	2,5	A-B-C	200
275	G4	0,5 - 1,5 - 2,5	50	---	---	---	---
276		0,5 - 1,5 - 2,5	50	B7	0,5	A-T	200
277		0,5 - 1,5 - 2,5	100	---	---	---	---
278		0,5 - 1,5 - 2,5	100	B8	1,5	A-B	200
279		0,5 - 1,5 - 2,5	400	---	---	---	---
280		0,5 - 1,5 - 2,5	400	B31	2,5	A-T	200
281		0,5 - 1,5 - 2,5	600	---	---	---	---
282		0,5 - 1,5 - 2,5	600	B7	0,5	A-B-C	200
283	G5	0,5 - 1,5 - 2,5	50	---	---	---	---
284		0,5 - 1,5 - 2,5	50	B12	0,5	B-T	200
285		0,5 - 1,5 - 2,5	100	---	---	---	---
286		0,5 - 1,5 - 2,5	100	B20	1,5	B-C	200
287		0,5 - 1,5 - 2,5	400	---	---	---	---
288		0,5 - 1,5 - 2,5	400	B23	2,5	B-C-T	200
289		0,5 - 1,5 - 2,5	600	---	---	---	---
290		0,5 - 1,5 - 2,5	600	B12	0,5	A-B-C	200
291	G6	0,5 - 1,5 - 2,5	50	---	---	---	---
292		0,5 - 1,5 - 2,5	50	B15	0,5	C-T	200
293		0,5 - 1,5 - 2,5	100	---	---	---	---
294		0,5 - 1,5 - 2,5	100	B16	1,5	A-C	200
295		0,5 - 1,5 - 2,5	400	---	---	---	---
296		0,5 - 1,5 - 2,5	400	B21	2,5	A-C-T	200
297		0,5 - 1,5 - 2,5	600	---	---	---	---
298		0,5 - 1,5 - 2,5	600	B15	0,5	A-B-C	200
299		0,5 - 1,5 - 2,5	800	---	---	---	---
300		0,5 - 1,5 - 2,5	800	B16	1,5	A-B-C-T	200

Fonte: o autor

Considerando caso 251 para exemplificação, neste cenário no instante 0,5s é inserida uma carga de 50% da nominal do barramento B24 (no próprio barramento), a seguir no instante 1,5s é inserida outra carga de 50% da nominal do barramento B27 (também no próprio barramento) e seguindo nos instantes 2,5s e 3,5s com inserção das cargas nos barramentos B28 e B29.

Dessa forma se tem a evolução de carga em passos com intervalo de evolução de 1 segundo, sendo assim, não há tempo para que o sistema se estabilize totalmente em um novo ponto de operação durante esse intervalo, aumentando assim a chance de instabilidade após a inserção do último estágio de carregamento.

Contudo, espera-se que para casos de incrementos de 50% e 100% o sistema não entre em instabilidade, apenas alterando seu ponto de operação (devido a atuação de reguladores de tensão e velocidade presentes no modelo IEEE 39-Bus). Já para os incrementos de 400% e 600%, espera-se que a instabilidade ocorra.

A ferramenta de software de simulação pode ser visualizada na figura 9. Após a simulação, a ferramenta apresenta os resultados em uma tela gráfica, a partir da qual se podem exportar os mesmos, em formato CONTRADE ou CSV, assim como imprimir os gráficos ou mesmo enviá-los para a área de clipboard do Windows.

Os arquivos CSV foram utilizados para importação para o Excel. As planilhas Excel são utilizadas como fonte de informações para o classificador Fuzzy aqui implementado, assim como também servem para armazenamento dos resultados do processamento efetuado.

Figura 9 – Ferramenta PS Simul

Fonte: o autor

Consideraram-se como entradas do processamento Fuzzy, os valores de tensão das barras do sistema IEEE 39-Bus, geradas pelas simulações dos diversos casos de falta e carregamento, os quais são processados de modo a se fazer a classificação das tensões de barras.

Os valores de tensão de barras são utilizados como um perfil de identificação do sistema elétrico, sendo este constituído a cada aquisição de informação como um vetor contendo todas as tensões das barras consideradas simultaneamente. Este vetor é classificado como se fosse uma entidade única representando, a cada instante, o sistema elétrico.

Desta forma obtém-se uma “assinatura” característica para a operação em condição de estabilidade, a qual pode ser visualizada na figura 13. A assinatura caracteriza o comportamento do sistema IEEE 39-Bus para as condições operacionais normais, incluindo a situação de ocorrências de contingências (faltas) no sistema, desde que não resultem em instabilidade do mesmo.

Esta assinatura, para uma situação de estabilidade, resulta composta por famílias de clusters que representam o comportamento deste sistema. O sistema desloca-se entre os diversos clusters, conforme seu estado evolui no decorrer do tempo.

Os clusters se distribuem nas famílias, tendo em cada família, centroides com grandes similaridades entre si, conforme figura 12 que retrata os centroides obtidos para o caso 1, da relação de casos simulados.

A dinâmica do processo baseia-se na verificação de criação de famílias de clusters; clusters muito distintos indicam uma condição de instabilidade do sistema elétrico.

O caso 1, em específico, contempla uma falta fase-terra, aplicada na barra 2, no instante 0,5 segundos, com duração de 100 ms, mas que não resulta em instabilidade do sistema elétrico, figura 10.

Figura 10 - Caso 1 Estável – Gráfico dos Módulos Tensões de todas as barras. Visão parcial

Fonte: o autor

Figura 11 – Caso 1 – Estável – Comportamento dos Clusters

Fonte: o autor

Figura 12 - Assinatura do Sistema IEEE 39-Bus, em operação estável

Fonte: o autor

Os clusters 1 e 2 definem duas famílias presentes na assinatura do sistema IEE 39-Bus, conforme figuras 13 e 14.

Figura 13 - Cluster 1 para o caso 1

Fonte: o autor

Figura 14 - Cluster 2 para o caso 1

Fonte: o autor

A partir deste ponto, os demais clusters distribuem-se em torno de um destes clusters, formando as famílias de clusters, figura 15.

Figura 15 – Caso 1 – Composição da assinatura

Fonte: o autor

Conforme o estado operacional do sistema elétrico se altera tendendo a instabilidade de tensão, os centroides dos clusters se distanciam entre si, formando novas famílias e o vetor de tensões do sistema desloca-se entre estes vários clusters.

Observando-se alterações nesta assinatura, pode-se inferir se o sistema está em uma condição de instabilidade ou não. Alterações nesta assinatura decorrerão das variações operacionais que levam o sistema à condição de instabilidade.

Este fato pode ser observado aplicando-se a metodologia à simulação do caso 10, o qual apresenta uma falta trifásica para terra, na barra 2, com início em 0,5 segundos e duração de 500 ms, resultando em instabilidade do sistema, figura 16.

Figura 16 – Caso 10 – Instabilidade devido a uma falta trifásica a terra

Fonte: o autor

Figura 17 - Caso 10 – Clusters

Fonte: o autor

Figura 18 – Caso 10 – Composição dos clusters

Fonte: o autor

Conforme a simulação prossegue, pode-se observar a criação de clusters com centroides mais diferentes entre si, assim como o comportamento do perfil de tensão ao migrar de um cluster para outro conforme evolui a simulação. A distribuição dinâmica da participação do perfil em cada cluster tem característica distinta dependendo da situação atual do sistema elétrico.

VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA

Dentre a relação de casos gerados para o IEEE 39-Bus, considerou-se para a validação da metodologia, casos não utilizados durante a fase de concepção da mesma.

Para esta validação, foram considerados casos com:

- Carregamento sem instabilidade
- Carregamento resultando em instabilidade
- Carregamento e falta, mas sem resultar em instabilidade
- Carregamento e falta, resultando em instabilidade

CARREGAMENTO SEM INSTABILIDADE

Caso 251

Neste caso, 50% do valor nominal das cargas que estão nas barras B24, B27, B28 e B29 são inseridas no sistema nos instantes de 0,5 s, 1,5 s, 2,5 s e 3,5 s, respectivamente.

Este carregamento não chega a causar instabilidade, conforme pode ser observado pela figura 19.

Figura 19 – Caso 251 – Carregamento não causa instabilidade

Fonte: o autor

Figura 20 – Caso 251– Clusters

Fonte: o autor

CARREGAMENTO RESULTANDO EM INSTABILIDADE

Caso 299

Contempla apenas carregamento resultando em instabilidade de tensão, conforme figura 21. Este se caracteriza por variação na carga das barras B15, B16 e B21, seguindo a porcentagem nominal de 800%, que se refere ao valor das cargas que serão inseridas em cada barra. Neste caso, 800% do valor nominal das cargas que estão nas barras B15, B16 e B21 serão inseridas no sistema nos instantes de 0,5 s, 1,5 s e 2,5 s, respectivamente.

Figura 21 – Caso 299 – Instabilidade devido a excesso de carga

Fonte: o autor

Figura 22 – Caso 299 - Instável - Clusters

Fonte: o autor

CARREGAMENTO E FALTA, MAS SEM RESULTAR EM INSTABILIDADE

Caso 256

Não ocorre instabilidade permanente do sistema, apenas a perturbação devido as faltas, conforme figuras 23 e 24.

Contempla cenários de variação de carregamento do sistema. A disposição dos instantes de chaveamento foi colocada na mesma ordem em que as barras dos grupos estão dispostas.

A porcentagem nominal de carregamento se refere ao valor das cargas que serão inseridas em cada barra, sendo que a carga a ser inserida terá a porcentagem de carga especificada em relação à carga que já está conectada ao barramento. Neste caso, 400% do valor nominal das cargas que estão nas barras B24 - B27 - B28 e B29 serão inseridas no sistema nos instantes de 0,5 s, 1,5 s, 2,5 s e 3,5 s, respectivamente. Haverá também a aplicação de uma falta do tipo A-B-T na barra B28 no instante 2,5 s, com duração de 200ms.

Figura 23 – Caso 256 – Estável - carregamento e falta A-B-T

Fonte: o autor

Figura 24 - Caso 256 – Estável - Clusters

Fonte: o autor

CARREGAMENTO E FALTA, RESULTANDO EM INSTABILIDADE

Caso 258

Ocorre instabilidade do sistema, conforme figuras 25 e 26.

Contempla carregamento e falta, resultando em uma condição de instabilidade do sistema. A simulação comporta uma falta A-B-C, na barra 29, em 3,5 s e duração de 200ms. A disposição dos instantes de chaveamento do carregamento foi colocada na mesma ordem em que as barras do grupo estão dispostas.

A porcentagem nominal de carregamento se refere ao valor das cargas que serão inseridas em cada barra, sendo que a carga a ser inserida terá a porcentagem de carga especificada em relação à carga que já está conectada ao barramento. Neste caso, 600% do valor nominal das cargas que estão nas barras B24 - B27 - B28 e B29 foram inseridas no sistema nos instantes de 0,5 s, 1,5 s, 2,5 s e 3,5 s, respectivamente.

Figura 25 – Caso 258 – carregamento com falta A-B-C

Fonte: o autor

Figura 26 – Caso 258 - Clusters

Fonte: o autor

CONCLUSÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A prática é o melhor de todos os instrutores
Publilius Syrus

Conclui-se que, baseando-se nos resultados dos casos analisados, a visualização contínua dos centroides dos clusters, permite observar qualitativamente situações de instabilidade do sistema elétrico estudado, uma vez que os perfis destes clusters vão se alterando, a partir da sua assinatura característica, conforme a evolução da situação de instabilidade.

Do comportamento dos clusters pode-se, então, inferir o estado de estabilidade do sistema, de forma independente do uso dos modelos tradicionais nos estudos dos sistemas elétricos de potência, ressaltando-se que não é um requisito para a abordagem aqui proposta, o conhecimento da topologia da rede elétrica do sistema em estudo.

A metodologia, aqui proposta, pode ser utilizada por outras empresas do setor elétrico, uma vez que obtém as assinaturas do SEP em estudo, a partir de dados coletados do processo elétrico do mesmo.

Journaux et al, 2014 apresentam um procedimento para se determinar o número ótimo de clusters para o processo de classificação. Neste procedimento, utiliza-se o algoritmo K-means para valores crescentes de clusters. Para cada valor, é calculado um índice de validade global, que mede a eficácia da classificação realizada pelo algoritmo. Quanto menor o índice, maior a qualidade da classificação.

O número ótimo de clusters é obtido ao se plotar um gráfico relacionando o índice de validade global com o número de clusters. Considera-se o número de clusters ótimo como sendo o menor número de clusters, a partir do qual a curva do gráfico sai do intervalo de confiança em torno da linha que se sobrepõe (ajustada) aos últimos cinco pontos plotados no gráfico.

A verificação se este número ótimo de clusters pode constituir um indicador do comportamento do sistema elétrico, conforme seu valor altera-se com a variação dos dados de entrada, pode ser um estudo a ser considerado.

Uma melhoria da classificação poderia ser avaliada com o uso da métrica de distância Mahalanobis, a qual considera a estrutura de correlação do sistema, juntamente com um Sistema Mahalanobis-Taguchi (SMT). Soylemezoglu e Jagannathan (2011) apresentam um esquema de detecção, isolamento e prognóstico de faltas, baseado em um modelo de Sistema Mahalanobis-Taguchi (SMT).

Neste esquema proposto procede-se a integração dos dados provenientes de diversos e distintos sensores em uma única métrica de desempenho utilizando Distância de Mahalanobis (MD) e efetua-se a classificação das faltas em conjuntos distintos, baseando-se nos valores de MD obtidos.

Este sistema define um classificador ao construir uma escala contínua de medição, não dependendo de aprendizagem a partir de dados históricos. O sistema MTS inicia-se com uma coleção de dados obtidos a partir da observação de situações normais do processo a ser analisado.

A partir destes dados, escolhe-se uma combinação de características deste processo em análise, e calcula-se a distância de Mahalanobis (MD) entre elas; de forma a verificar a habilidade de se diferenciar grupos característicos de situações normais, daqueles de situações com anomalias.

Caso MD não consiga identificar os distintos grupos, uma nova combinação de características do processo é considerada. Quando a combinação correta é encontrada, os métodos Tagushi são então utilizados para se proceder à avaliação da contribuição de cada uma destas características, e caso possível efetuar uma redução de dimensionalidade, eliminando-se aquelas características que não influenciam a análise.

Uma abordagem descentralizada também poderia ser verificada, onde cada conjunto de barras coerentes seria tratado como um sistema em separado. O processo

consideraria um contexto de cálculo de estabilidade descentralizado semelhante à abordagem apresentada por Amorim e Romero (2009), no cálculo de fluxo de potência ótimo descentralizado.

REFERÊNCIAS

- AMORIM E. A., ROMERO R., **Fluxo de Potência Ótimo Descentralizado Utilizando Algoritmos Evolutivos Multiobjetivo**, Revista Controle & Instrumentação, Vol. 20, N. 2, Abril/Maio/ Jun/2009
- ASSIS, T.M.L., NOHARA, A.A. E VALENTINI, T. M., **Power System Dynamic Security Assesment through a Neuro-Fuzzy Scheme**, Proceedings of 15th Conference on Applications to Power Systems, ISAP'09, 2009.
- BASTOS, M.R., MARTINI, J. S. C., **A Model Free Voltage Stability Security Assessment Method Using Artificial Intelligence**, Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LATAN), 2015 IEEE PES, pp. 679 – 682, 2015. IEEE Conference Publications
- CAO G.; CHEN L.; AIHARA, K., **Power System Voltage Stability Assessment Based on Branch Active Powers**, Power Systems, IEEE Transactions on, 2015, Vol. 30, Issue 2, pp. 989 - 996,
- CHAKRABARTI S., JEYASURYA B., **Multicontingency Voltage Stability Monitoring of Power Systems Using Radial Basis Function Network**, Intelligent Systems Application to Power Systems, 2005. Proceedings of the 13th International Conference on, pp. 314-319, 2005
- CHAKRABORTY K., CHAKRABORTI A. AND DE A., **Integrated Voltage Stability Indicator Based Assessment of Voltage Stability in a Power System and Application of ANN**, Iranian Journal of Electrical and Computer Engineering, vol. 10, nº 2, pp. 85-92, summer-fall 2011
- CHEN, M., LINKENS, D. A., **Rule-base self-generation and simplification for data-driven fuzzy models**, 2001 IEEE International Fuzzy Systems Conference, 2001
- CHEN, M., **Establishing Interpretable Fuzzy Models from Numeric Data**, Proceedings of the 4th World Congress on Intelligent Control and Automation June 10-14, 2002, Shanghai, P.R.China
- CHIANG, H., TONG, J., TADA, Y., **On-line Transient Stability Screening of 14.000 bus Models Using TEPCO-BCU: Evaluations and Methods**, 2010.
- CHIU, S. L., **Extracting Fuzzy Rules from Data for Function Approximation and Pattern Classification**, Chapter 9 in Fuzzy Information Engineering: A Guided Tour of Applications, ed. D. Dubois, H. Prade, and R. Yager, John Wiley & Sons, 1997
- DEMETRIOU P., HADJIDEMETRIOU L., KYRIACOU A., KYRIAKIDES E. and PANAYIOTOU C., **Real-Time Identification of Coherent Generator Groups**, 2015 IEEE Eindhoven PowerTech, 2015

DONG, Z. Y., XU, Y., ZHANG, P, WONG, K. P, **Using IS to Assess an Electric Power Systems Real-time Stability**, IEEE Intelligent Systems, pp.66, 2013

DJUKANOVIC, M., **Artificial Neural Network Based Identification of Dynamic Equivalents**, Electric Power Systems Research, n° 24, 1992

EL-ARINI M. M. M., FATHY A., **Identification of Coherent Generators Using Fuzzy C-Means Clustering Algorithm and Construction of Dynamic Equivalent of Power System**, J. Electrical Systems 6-2, 2010: x-xx

EL-ARINI M. M. M., FATHY A., **Identification of Coherent Generators Based on Fuzzy Algorithm**, Proceedings of the 14th International Middle East Power Systems Conference (MEPCON'10), Cairo University, Egypt, December 19-21, 2010, Paper ID 303

EL-ARINI M. M. M., FATHY A., **Identification of Coherent Generators for Large-Scale Power Systems Using Fuzzy Algorithm**, WSEAS Transactions on Systems and Control, Issue 6, vol. 6, June 2011

ESAKA, T., KATAOKA, Y., OHTAKA, T., IWAMOT, S., **Voltage Stability Preventive Control Using a New Voltage Stability Index**, International Conference on Power system Technology – POWERCON 2004, Singapore, 21-24 nov/2004.

FAWCETT T., **Using Rule Sets to Maximize ROC Performance**, Data Mining, 2001, ICDM 2001, Proceedings IEEE International Conference on, 2001

FOTUHI M., GHAFOURI A., **Uncertainty Consideration in Power System Reliability Indices Assessment Using Fuzzy Logic Method**, Power Engineering, 2007 Large Engineering Systems Conference on

JINLI Z.; HONGJIE J.; XIAODAN Y. **Voltage stability control based on real power flow tracing**, TENCON 2008 - 2008 IEEE Region 10 Conference, 2008

JOURNAUX L., TIZON X., FOUCHEROT I., GOUTON P., **Dimensionality Reduction Techniques: An Operational Comparison On Multispectral Satellite Images Using Unsupervised Clustering**, Conference: Signal Processing Symposium, 2006. NORSIG 2006. Proceedings of the 7th Nordic, 2006

KAMWA, I., PRADHAN, A. K., JOSS, G., SAMANTARAY, S. R., **Fuzzy Partitioning of a Real Power System for Dynamic Vulnerability Assessment**, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 24, n 3, aug/2009.

KOHONEN, T., **The Self-Organising Map**, Proceedings of IEEE, vol. 78, n° 9, September 1990

KUIPENG C., PENG Z., **Research of Fuzzy algorithm of Determining Threshold Value Based on MTS**, Computational and Information Sciences (ICCIS), 2010 International Conference on

KUNDUR P., PASERBA J., AJJARAPU V., ANDERSSON G., BOSE A., CANIZARES C., HATZIARGYRIOU N., HILL D., STANKOVIC A., TAYLOR C., CUTSEM T. V., VITTAL V., **Definition and Classification of Power System Stability**, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, N. 2, May 2004

LINO, O.Y., FETTE, M., DONG, Z.Y., **Splitting-based Dynamic Equivalencing in Power Systems**, Power Tech, IEEE, Russia, 2005.

LIU H., BOSE A. AND VENKATASUBRAMANIAN V., **A Fast Voltage Security Assessment Method Using Adaptive Bounding**, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 15, nº 3, pp. 1137-1141, August 2000

MACHIAS, A. V., SOUFLIS, J. L., DIALYNAS, E. N., **Power System Stability Evaluation Using a Fuzzy Classification Method**, Proceedings of 25th Conference on Decision and Control, Athens, Greece, December/1986.

MENDES, J.; SECO, R. ; ARAUJO, R., **Automatic Extraction of the Fuzzy Control System for Industrial Processes**, Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA), 2011 IEEE 16th Conference on, pp. 1-8, 5-9 September. 2011

MING, Z., SHI, D., SONG, X., KUO, T., **Indices System and Methods for Power Grid Security Assessment based on Dynamic Fuzzy**, International Conference on electrical and Control Engineering, 2010

NOMURA, T, MIYOSHI, T., **An Adaptive Rule Extraction with the Fuzzy Self-organizing Map and Comparison with Other Methods**, IEEE Proceedings of ISUMA-NAFIPS '95, 1995

OLIVEIRA, E.N. DE, PADILHA, A., MINUSSI, C. R., **Utilização de índices de Estabilidade Transitória para a Avaliação de Segurança Dinâmica**, IEEE Latin America Transactions, vol. 1, nº 1, oct 2003.

OLIVEIRA, N., BOTEAGA, L., BERI, C., CAMPOS, M., NERIS, V., ARAÚJO, R. B., **Visualização de incertezas para a melhoria da consciência situacional em sistemas de chamadas de emergência**, IHC '14 Proceedings of the 13th Brazilian Symposium on Human Factors in Computing Systems, pp. 405-408, October 27 - 31, Porto Alegre, Brazil, 2014

PAVITHRA P., MAHESWARI N. U., **Automatic Semantic Rule Based Coordination for Content Extraction in Videos Using Fuzzy Ontology**, 2014 International Conference on Innovations in Engineering and Technology (ICIET'14), Vol. 3, Special Issue 3, March 2014

PRATI R.C, BATISTA G. E. A. P. A. AND MONARD M. C., **Curva ROC para Avaliação de Classificadores**, IEEE Latin America Transactions, Vol. 6, N. 2, June 2008

SAJAN, K.S.; TYAGI, B.; KUMAR, V., **Genetic algorithm based artificial neural network model for voltage stability monitoring**, Power Systems Conference (NPSC), 2014 Eighteenth National, pp. 1 – 5

SANCHO-ROYO A., VERDEGAY J.L., **Fuzzy Coherence Measures**, International Journal of Intelligent Systems, Vol. 20, 1–11, 2005

SASTRY, S., VARAIYA, P., **Coherency for Interconnected Power Systems**, IEEE transactions on Automatic Control, vol. ac-26, n° 1, feb/1981.

SHRIVASTAVA R.K., CHOUBE S.C. AND ARYA L.D. **Voltage Stability Assessment Using Sensitivity Under Line Outage Condition**, International Journal on Emerging Technologies 2(1): 78-82, 2011

SOYLEMEZOGLU A., JAGANNATHAN S., **Mahalanobis-Taguchi System as a Multi-Sensor Based Decision Making Prognostics Tool for Centrifugal Pump Failures**, IEEE Transactions on Reliability, Vol. 60, N. 4, December 2011

SUI, H., ZHAO, J., LEE, W. J. **Voltage Stability Assessment in the deregulated Electricity Markets**, DRPT2008 6-9 April 2008 Nanjing China, pp. 1462-1471

TRAN T., CHOI J., JEAN D., CHOO J. AND BILLINTON R., **Sensitivity Analysis of Probabilistic Reliability Evaluation of IEEE MRTS using TRELSS**, 8th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, Iowa State University, Ames, Iowa, September 12-16, 2004

WANG S., HUANG P., **A Fuzzy Method for Power System Model Reduction**, Budapest Hungary, jul/2004.

WANG S., HUANG P., **Fuzzy c-means clustering for power system coherency**, Systems, Man and Cybernetics, 2005 IEEE International Conference on

WILFERT, H.H., VOITHLÄNDER, K., ERLICH, I., **Dynamic Coherency Identification of Generators Using Self-Organising Feature Maps**, Control Engineering Practice, vol. 9, 2001

Xu, W., **Adaptive Fuzzy Kernel Clustering Algorithm**, International Journal of Fuzzy Logic Systems (IJFLS) Vol.5, No.4, October 2015

ZADETH, L. A., **Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes**, IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS, VOL. SMC-3, NO. 1, JANUARY 1973

ZENG, S., YONGBAO HE Y., JIANG J., **A Hierarchical Fuzzy System with Automatical Rule Extraction**, The 2005 IEEE International Conference on Fuzzy Systems

ZHANG R., XU, Y., DONG Z. Y., ZHANG P., WONG K. P. **Voltage Stability Margin Prediction by Ensemble Based Extreme Learning Machine**, Power and Energy Society General Meeting (PES), 2013 IEEE , pp. 1-5, 21-25 July 2013

ZHOU D. Q., ANNAKKAGE U. D. AND RAJAPAKSE A; D., **On line Monitoring of Voltage Stability Margin Using an Artificial Neural Network**, IEEE Transactions On Power Systems, vol. 25, n^o. 3, pp. 1566-1574, August 2010

ANEXO A – IEEE 10 Generator 39 Bus System

General Outline

This IEEE 39 bus system is well known as 10-machine New-England Power System. Generator 1 represents the aggregation of a large number of generators. All parameters shown below are come from the book titled 'Energy Function Analysis for Power System Stability'[1]. This book took them from the paper by T. Athay et al.

Network

Basic Data and Characteristics

Generators

Parameters for the two-axis model of the synchronous machines are shown in Tables as follows.

All values are given on the same system base MVA.

Unit No.	H	Ra	x'd	x'q	xd	xq	T'do	T'qo	xl
1	500.0	0	0.006	0.008	0.02	0.019	7.0	0.7	0.003
2	30.3	0	0.0697	0.170	0.295	0.282	6.56	1.5	0.035
3	35.8	0	0.0531	0.0876	0.2495	0.237	5.7	1.5	0.0304
4	28.6	0	0.0436	0.166	0.262	0.258	5.69	1.5	0.0295
5	26.0	0	0.132	0.166	0.67	0.62	5.4	0.44	0.054
6	34.8	0	0.05	0.0814	0.254	0.241	7.3	0.4	0.0224
7	26.4	0	0.049	0.186	0.295	0.292	5.66	1.5	0.0322
8	24.3	0	0.057	0.0911	0.290	0.280	6.7	0.41	0.028
9	34.5	0	0.057	0.0587	0.2106	0.205	4.79	1.96	0.0298
10	42.0	0	0.031	0.008	0.1	0.069	10.2	0.0	0.0125

Lines/Transformers

The net work data for this system is shown in the Table below. All values are given on the same system base MVA.

Line Data					Transformer Tap	
From Bus	To Bus	R	X	B	Magnitude	Angle
1	2	0.0035	0.0411	0.6987	0.000	0.00
1	39	0.0010	0.0250	0.7500	0.000	0.00
2	3	0.0013	0.0151	0.2572	0.000	0.00
2	25	0.0070	0.0086	0.1460	0.000	0.00
3	4	0.0013	0.0213	0.2214	0.000	0.00
3	18	0.0011	0.0133	0.2138	0.000	0.00
4	5	0.0008	0.0128	0.1342	0.000	0.00
4	14	0.0008	0.0129	0.1382	0.000	0.00
5	6	0.0002	0.0026	0.0434	0.000	0.00
5	8	0.0008	0.0112	0.1476	0.000	0.00
6	7	0.0006	0.0092	0.1130	0.000	0.00
6	11	0.0007	0.0082	0.1389	0.000	0.00
7	8	0.0004	0.0046	0.0780	0.000	0.00
8	9	0.0023	0.0363	0.3804	0.000	0.00
9	39	0.0010	0.0250	1.2000	0.000	0.00
10	11	0.0004	0.0043	0.0729	0.000	0.00
10	13	0.0004	0.0043	0.0729	0.000	0.00

13	14	0.0009	0.0101	0.1723	0.000	0.00
14	15	0.0018	0.0217	0.3660	0.000	0.00
15	16	0.0009	0.0094	0.1710	0.000	0.00
16	17	0.0007	0.0089	0.1342	0.000	0.00
16	19	0.0016	0.0195	0.3040	0.000	0.00
16	21	0.0008	0.0135	0.2548	0.000	0.00
16	24	0.0003	0.0059	0.0680	0.000	0.00
17	18	0.0007	0.0082	0.1319	0.000	0.00
17	27	0.0013	0.0173	0.3216	0.000	0.00
21	22	0.0008	0.0140	0.2565	0.000	0.00
22	23	0.0006	0.0096	0.1846	0.000	0.00
23	24	0.0022	0.0350	0.3610	0.000	0.00
25	26	0.0032	0.0323	0.5130	0.000	0.00
26	27	0.0014	0.0147	0.2396	0.000	0.00
26	28	0.0043	0.0474	0.7802	0.000	0.00
26	29	0.0057	0.0625	1.0290	0.000	0.00
28	29	0.0014	0.0151	0.2490	0.000	0.00
12	11	0.0016	0.0435	0.0000	1.006	0.00
12	13	0.0016	0.0435	0.0000	1.006	0.00
6	31	0.0000	0.0250	0.0000	1.070	0.00
10	32	0.0000	0.0200	0.0000	1.070	0.00
19	33	0.0007	0.0142	0.0000	1.070	0.00
20	34	0.0009	0.0180	0.0000	1.009	0.00

22	35	0.0000	0.0143	0.0000	1.025	0.00
23	36	0.0005	0.0272	0.0000	1.000	0.00
25	37	0.0006	0.0232	0.0000	1.025	0.00
2	30	0.0000	0.0181	0.0000	1.025	0.00
29	38	0.0008	0.0156	0.0000	1.025	0.00
19	20	0.0007	0.0138	0.0000	1.060	0.00

Power and Voltage Set points

All values are given on the same system base MVA. Note that generator 2 is the swing node.

Bus	Type	Voltage [PU]	Load		Generator		
			MW	MVar	MW	MVar	Unit No.
1	PQ	-	0.0	0.0	0.0	0.0	
2	PQ	-	0.0	0.0	0.0	0.0	
3	PQ	-	322.0	2.4	0.0	0.0	
4	PQ	-	500.0	184.0	0.0	0.0	
5	PQ	-	0.0	0.0	0.0	0.0	
6	PQ	-	0.0	0.0	0.0	0.0	
7	PQ	-	233.8	84.0	0.0	0.0	
8	PQ	-	522.0	176.0	0.0	0.0	
9	PQ	-	0.0	0.0	0.0	0.0	
10	PQ	-	0.0	0.0	0.0	0.0	
11	PQ	-	0.0	0.0	0.0	0.0	
12	PQ	-	7.5	88.0	0.0	0.0	

All values shown are in per unit at 60Hz on a 100MVA base.

*** Taken from http://psdyn.ece.wisc.edu/IEEE_benchmarks/ *****