

# Utilização de Índices de Estabilidade Transitória para a Avaliação de Segurança Dinâmica

E. N. de Oliveira, A. Padilha, Member IEEE, C. R. Minussi

**Resumo**—No cálculo da estabilidade transitória a busca por índices que mostrem o quanto um sistema de energia elétrica, frente à ocorrência de uma contingência, é estável ou instável têm sido o objeto de vários estudos. Índices baseados nos conceitos de coerência, conversão transitória de energia entre energia cinética e potencial, e três produtos escalares entre variáveis dinâmicas de estado têm sido relatados como promissores. Porém, a experiência tem mostrado que quando estes índices são aplicados individualmente, obtém-se bons resultados apenas para casos especiais. Neste sentido, a composição destes índices (considerando-se a influência dos vários índices) tem sido sugerida e, neste trabalho, é apresentada uma composição de índices, de forma sistemática, a partir de um tratamento estatístico. Este modo de classificação das contingências conduz a uma conclusão rápida e confiável sobre a estabilidade do sistema.

**Palavras-chave**— Estabilidade transitória, segurança dinâmica, simulação no domínio do tempo, índices de estabilidade.

## I. LISTA DE SÍMBOLOS

|                 |   |
|-----------------|---|
| $\theta_i$      | : ângulo do rotor do i-ésimo gerador relativo ao centro de inércia COI; |
| $NG$            | : número total de geradores;  |
| $t_{cr}$        | : tempo crítico de eliminação da falta;                                 |
| $t_{ef}$        | : tempo de eliminação da falta;   |
| $T$             | : tempo fixo após a eliminação da falta;                                |
| $V_{ke}$        | : energia cinética transitória total;                                   |
| $V_{pe}$        | : energia potencial transitória total;                                  |
| $M_i$           | : constante de inércia do i-ésimo gerador;                              |
| $M_t$           | : constante de inércia total;   |
| $Pm_i$          | : potência mecânica de entrada do i-ésimo gerador;                      |
| $Pe_i$          | : potência elétrica de saída do i-ésimo gerador ;                       |
| $\omega_i$      | : velocidade do rotor do i-ésimo gerador relativo ao COI;               |
| $\theta_i^{cl}$ | : ângulo do rotor do i-ésimo gerador para o tempo de extinção da falta; |
| $ID$            | : índice individual;  |
| $s$             | : desvio padrão;  |
| $\bar{x}$       | : média aritmética;   |
| $NI$            | : número de índices;  |
| $C$             | : pesos para a composição dos índices;                                  |
| $CM$            | : índice composto pela média aritmética;                                |
| $CS$            | : índice composto de forma sistemática.                                 |

## II. INTRODUÇÃO

ÍNDICES que informem o quanto um Sistema de Energia Elétrica (SEE) é estável ou instável, quando ocorre uma grande perturbação, têm sido o objetivo de muitos estudos nas últimas décadas. Algumas propostas obtêm os índices de simulação no domínio do tempo [1], [2], [3], outras buscam explorar o cálculo da margem de estabilidade a partir dos chamados métodos diretos [4],[5], ou com outras técnicas como, por exemplo, através do uso de uma máquina equivalente SIME [6]. O objetivo sempre é a busca de uma forma rápida e confiável de analisar grandes perturbações que possam ocorrer nos SEE. Uma rápida classificação das perturbações com indicação de estável ou de instável, em termos de estabilidade transitória, são fundamentais para análise dinâmica de contingências. Toda boa proposta de analisar contingências deve apresentar algumas características importantes:

- classificação das contingências;
- precisão e confiabilidade;
- eficiência computacional.

A análise das contingências é realizada utilizando-se índices obtidos a partir da simulação no domínio do tempo. A proposta central é apresentar uma metodologia que possa ser incorporada aos tradicionais programas de cálculo de estabilidade transitória, uma vez que os engenheiros que atuam na área tem familiaridade e confiança em tais programas.

Neste trabalho apresentam-se resultados de uma abordagem para filtrar as contingências, fazendo uma classificação rápida com relação ao estado de sua estabilidade. Esta classificação é feita a partir de índices compostos obtidos com simulação passo a passo com um tempo de simulação igual ao tempo de eliminação da falta ( $t_{ef}$ ) mais um tempo  $T = 0.5s$ . Os índices compostos, são obtidos aqui de duas formas: uma composição pela média aritmética dos índices individuais [1], ou seja, atribuindo fatores multiplicativos (pesos) iguais para cada índice individual e a outra através de uma composição de forma sistemática, na qual atribui-se diferentes pesos, valorizando os melhores índices, os quais são determinados de forma estatística.

Outra alternativa de abordagem de avaliação da segurança dinâmica, refere-se às metodologias de inteligência artificial [9]-[10], em especial às redes neurais artificiais [11]-[14]. Redes neurais artificiais são concepções em *hardware* e /ou *software* que exibem capacidade de aprender com a experiência, ou seja, por processo adaptativo baseado em estímulos convenientemente aplicados na entrada e na saída. O funcionamento das redes neurais é, portanto, constituído por

Este trabalho conta com apoio do CNPq, processo nº 141718/2001-3.

E. N. de Oliveira é estudante de doutorado na Universidade Estadual Paulista, Campus de Ilha Solteira, SP, Brasil (e-mail: edni@dee.feis.unesp.br)

A. Padilha Feltrin é professor adjunto na Universidade Estadual Paulista, Campus de Ilha Solteira, SP, Brasil (e-mail: padilha@dee.feis.unesp.br).

C. R. Minussi é professor adjunto na Universidade Estadual Paulista, Campus de Ilha Solteira, SP, Brasil (e-mail: minussi@dee.feis.unesp.br)

duas fases fundamentais: treinamento e análise. A fase de treinamento requer uma grande quantidade de processamento para a sua realização, enquanto que a fase de análise é efetivada, praticamente, sem esforço computacional. Estas avaliações são realizadas, em sua grande maioria, através da observação de algum índice de inferência [15] similarmente aos índices apresentados anteriormente. Este índice “mede” o grau de severidade da contingência sobre o sistema. Então, qualquer que seja a perturbação aplicada ao sistema – de pequena escala ou de grande escala – o seu impacto pode ser deduzido, através do uso de um índice apropriado, devendo refletir o mais preciso possível, o comportamento do sistema, do ponto de vista quantitativo e, principalmente qualitativo. Cada enfoque dado ao problema de análise de segurança (estático ou dinâmico, critérios de estabilidade de tensão ou de ângulo, etc.) requer um índice específico. Este tipo de resolução pode ser formulado, basicamente, sob dois enfoques: o primeiro trata-se da análise fundamentada em índices de estabilidade individuais. O segundo corresponde a determinação dos coeficientes de sintonia de um índice composto, podendo ser útil para a proposição de outros arranjos de pesos que possam contemplar diferentes fatores do sistema de forma automática. Neste caso, esta sintonia é determinada baseada na extração do conhecimento, considerando um conjunto de dados disponíveis na operação, obtido através de simulações realizadas, constituindo os exemplos do estágio de treinamento, para posterior realização das análises (geração de índices). Deste modo, o emprego de redes neurais para a obtenção de índice de estabilidade pode tornar-se uma opção interessante de realização, mas está fora do enfoque principal deste artigo, porém sob investigação.

Os testes, resultados e discussões são apresentados utilizando-se dois sistemas de potência: (1) sistema IEEE17 constituído por 17 geradores, 162 barras e 284 ligações [7] e (2) uma configuração do sistema Sul-brasileiro com 10 geradores, 45 barras, e 71 linhas [16].

### III. ÍNDICES INDIVIDUAIS PARA CLASSIFICAÇÃO DE CONTINGÊNCIAS

Os índices individuais para a classificação de contingências com relação a sua severidade, utilizados neste trabalho, são os descritos em [1]. Estes índices são baseados nos conceitos de coerência, conversão transitória de energia entre energia cinética e energia potencial, e três produtos escalares de variáveis de estado dos SEE, conforme descritos a seguir.

#### A. Índices Baseados na Coerência

Os índices baseados no conceito de coerência podem ser promissores na classificação de contingências na Análise de Segurança Dinâmica (DSA). A coerência é a medida de proximidade de todos os ângulos do rotor dos geradores (referidos ao centro de inércia COI) após a extinção da falta [1]. Obviamente, casos estáveis apresentam mais geradores coerentes que casos instáveis.

O índice de desempenho  $ID_1$  é definido para o conceito de coerência. Ele é dado pela máxima diferença entre o ângulo

máximo e o ângulo mínimo, em um curto período após a extinção da falta (neste trabalho  $T = 0.5s$ ), como mostrado em (1):

$$ID_1 = \max(\max \theta_i(t) - \min \theta_i(t)) \quad (1)$$

sendo que:

$$i = 1, 2, \dots, NG$$

$$t_{ef} \leq t \leq t_{ef} + T.$$

Deve-se observar que o parâmetro  $T$  foi arbitrado em  $0.5s$ , a partir de experiências realizadas de simulações, cujo objetivo é empregar um tempo de simulação adequadamente calibrado, ou seja, não demasiadamente grande que conduziria um a excessivo esforço computacional desnecessário e nem muito pequeno a ponto de comprometer a qualidade dos resultados.

#### B. Índices Baseados na Conversão de Energia Transitória

Os índices baseados no conceito de conversão de energia transitória (energia cinética e potencial), também revelam-se como promissores na classificação de contingências. A energia cinética está principalmente relacionada à velocidade dos geradores. A energia potencial inclui três partes: posição energética de todos os geradores em relação ao COI, energia magnética, e dissipação de energia, os dois últimos relacionados a rede de transmissão [4]. Na estabilidade transitória busca-se observar se os geradores do sistema perdem o sincronismo ou não após a extinção da falta. Se o sistema possui capacidade suficiente de energia potencial, então, o excesso de energia cinética injetada no sistema pode ser absorvida, e o sistema não perderá o sincronismo, alcançando um novo ponto de equilíbrio estável.

O índice  $ID_2$  é a máxima diferença entre a energia cinética transitória e a energia potencial transitória [1]. Este índice é obtido no mesmo período do índice  $ID_1$  e mostrado em (2):

$$ID_2 = \max(|V_{ke}(t) - V_{pe}(t)|) \quad (2)$$

#### C. Índices Baseados em Produtos Escalares entre Variáveis de Estado

Esses produtos utilizam os vetores de diferença de potência, velocidade e ângulo do rotor [1], conforme segue:

$$prod1 = \sum_{i=1}^{NG} f_i \cdot \omega_i \quad (3)$$

$$prod2 = \sum_{i=1}^{NG} f_i \cdot \theta_i \quad (4)$$

$$prod3 = \sum_{i=1}^{NG} \omega_i \cdot (\theta_i - \theta_i^{cl}) \quad (5)$$

com:

$$f_i = P_{mi} - P_{ei} - \frac{M_i}{M_t} P_{COI} \quad (6)$$

$$P_{COI} = \sum_{i=1}^{NG} (P_{mi} - P_{ei}) \quad (7)$$

sendo:

$$i = 1, 2, \dots, NG$$

A partir de  $prod1$ ,  $prod2$  e  $prod3$ , definem-se três índices  $ID_3$ ,  $ID_4$  e  $ID_5$  de acordo com (8), (9) e (10), respectivamente. Estes índices indicam a máxima diferença dos produtos escalares, no mesmo período usado para o índice  $ID_1$  [1]:

$$ID_3 = \max(prod1(t) - \min(prod1(t))) \quad (8)$$

$$ID_4 = \max(prod2(t) - \min(prod2(t))) \quad (9)$$

$$ID_5 = \max(prod3(t) - \min(prod3(t))) \quad (10)$$

#### D. Índices Compostos

Os índices individuais, aqui abordados, apresentam bons resultados para situações particulares, mas não podem, de forma confiável, serem usados em casos gerais, dependendo de fatores, tais como: tamanho do sistema, tipo de distúrbio e período de simulação após a extinção do distúrbio (falta). Da experiência de implementação com sucesso de classificação de contingências em tempo real, em análise de segurança estática, índices compostos são sugeridos para ordenação e seleção de contingências [1].

Os índices compostos podem ser calculados atribuindo pesos para cada índice individual e, então, é realizada a adição destes. Obviamente, um índice composto pode dar uma avaliação global dos diferentes aspectos dos SEE. Um índice individual poderá não ordenar as contingências perfeitamente para diferentes SEE, sob diferentes condições de severidade. É esperado que um índice composto forneça melhores resultados.

Logicamente, a atribuição de diferentes pesos valorizando os melhores índices tem um impacto na precisão da resposta. Neste trabalho foram considerados dois tipos de composição para comparação: no primeiro caso os pesos foram escolhidos, de tal forma que o índice composto ( $CM$ ) é a média dos índices individuais, ou seja, atribuídos pesos iguais para todos os índices. Assim, para cada falta ( $F$ ),  $CM_F$  é dado por:

$$CM_F = 0.2(ID_1)_F + 0.2(ID_2)_F + 0.2(ID_3)_F + 0.2(ID_4)_F + 0.2(ID_5)_F \quad (11)$$

sendo:

$F$  = número da falta.

Na outra calibração para a obtenção do índice composto ( $CS$ ), os pesos foram calculados de modo a privilegiar os índices que obtiveram melhores resultados. Deve-se lembrar que, os melhores índices são aqueles que apresentam maior dispersão entre os seus componentes correspondentes a um conjunto de faltas, sendo que seus pesos, podem ser obtidos de forma sistemática para um sistema de potência particular a partir de um tratamento estatístico dos dados [8].

O grau de dispersão de um conjunto de dados pode ser medido pelos desvios dos valores observados em relação a média. Entende-se por desvio, em relação a média, a diferença entre o valor observado e a média do conjunto de dados. É preciso considerar, no entanto, que cada dado possui um desvio em relação a média. Então, para julgar o grau de dispersão de todo o conjunto de dados com base nos desvios, é preciso observar todos os desvios. Não se pode usar a soma dos desvios como medida de dispersão. A soma dos desvios é

necessariamente igual a zero, porque os desvios com sinais positivos e negativos se compensam. É claro que o problema de achar um valor único para representar os desvios fica resolvido se, em lugar da soma dos desvios, for usada a soma dos quadrados dos desvios.

Assim, para medir a dispersão dos dados em torno da média usa-se a variância, que pode ser definida como a soma dos quadrados dos desvios dividida pelo número de dados. Também, define-se o cálculo da variância como a soma dos desvios dividida pelo número de graus de liberdade. O número de graus de liberdade é igual ao número de dados menos 1. Neste trabalho a variância foi calculada nesta última forma.

Como medida de dispersão, a variância apresenta a desvantagem de ter unidade de medida igual ao quadrado da unidade de medida dos dados. Então, é preciso definir uma medida de dispersão que seja a raiz quadrada da variância.

Deste modo, define-se o desvio padrão  $s$  como a raiz quadrada, com sinal positivo da variância. O desvio padrão, como a variância, mede a dispersão dos dados, mas possui a vantagem de usar a mesma unidade de medida dos dados.

Existem casos em que o uso da variância não é suficiente para comparar a dispersão entre diferentes índices. Supondo-se que num primeiro índice os seus componentes são: 1; 3; 5 e num segundo índice 53; 55; 57. A variância do primeiro índice é igual à variância do segundo índice, logo a dispersão em torno da média é exatamente a mesma nos dois índices. No entanto, esta dispersão no primeiro índice pode significar grandes mudanças físicas, o que não acontece para o segundo índice.

Essas observações refletem a idéia de dispersão relativa, ou seja, de dispersão em relação a média. Para medir dispersão relativa usa-se o coeficiente de variação. Por definição, coeficiente de variação ( $CV$ ) é a razão entre o desvio padrão  $s$  e a média aritmética  $\bar{x}$ . Essa razão é multiplicada por 100. Então, o coeficiente de variação para cada índice é dado em porcentagem, como segue:

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (12)$$

Assim, para o índice com componentes 1, 3 e 5, obtém-se  $CV = 66,7\%$ , enquanto que o índice com componentes 53, 55 e 57,  $CV = 3,6\%$ . Os valores dos coeficientes de variação confirmam a observação de que a dispersão dos dados em relação a média é muito importante no primeiro índice e pouco no segundo.

Desta forma, cada peso pode ser determinado pela divisão do  $CV_i$  de cada índice pelo somatório dos  $CV_i$ 's,  $i = 1, 2, \dots, NI$ , ou seja:

$$C_i = \frac{CV_i}{\sum_{i=1}^{NI} CV_i} \quad (13)$$

sendo:

$NI$  = número de índices.

O índice composto, de forma sistemática, para uma determinada falta  $F$  ( $CS_F$ ) é, então, obtido pelo somatório da multiplicação de cada coeficiente  $C_i$  em (13) com seus respectivos componentes dos índices ( $ID_i$ )<sub>F</sub>, com  $i = 1, \dots, NI$ :

$$CS_F = \sum_{i=1}^{Nf} C_i \cdot (ID_i)_F \quad (14)$$

Neste trabalho, com o uso de (12), um  $CV$ , é obtido para cada conjunto de faltas previamente simuladas e, então, a partir de (13), são calculados os pesos ( $C_1, C_2, C_3, C_4$  e  $C_5$ ). Estes pesos podem ser utilizados para obtenção de  $CS_F$  para avaliação de diferentes contingências que possam ocorrer no sistema, através do uso de (14).

#### IV. RESULTADOS

As faltas, abordadas aqui, são sempre um curto-circuito trifásico ocorrendo em uma barra, sendo eliminadas com desligamentos de linhas de transmissão ou em outros casos sem desligamentos, em um tempo de extinção da falta (tef). O modelo clássico foi utilizado para representar os geradores em todos os testes realizados. A simulação no domínio do tempo utiliza o método trapezoidal para a resolução numérica das equações diferenciais. Os índices compostos apresentados são sempre normalizados, a fim de facilitar as análises.

##### A. Sistema IEEE17 [7]

A primeira tarefa é realizar um conjunto de simulações visando a obtenção dos pesos para cálculo de  $CS_F$ , e definição das faixas de estabilidade para os índices  $CM_F$  e  $CS_F$ . Foram simuladas, até 2 segundos, aleatoriamente 40 faltas entre casos estáveis e instáveis (E/I). Os índices foram calculados em um tempo igual a tef mais 0.5 segundos. Nas tabelas apresentadas neste trabalho, as seguintes definições são adotadas: F indica o número da falta, BF indica a barra em falta, L significa linha que é desligada para eliminar a falta, LD indica se a linha é religada (S) ou não (N), tcr é o tempo crítico de eliminação daquela falta (cuja coluna indica o tempo máximo de estabilidade), E/I indica o tipo de estabilidade no tempo de 2s.

Os cálculos dos coeficiente  $C_b$ , como citado em (13), dependem inicialmente da obtenção dos coeficientes de variação  $CV$  obtidos por (12) para os componentes de cada índice individual ( $ID_1$  a  $ID_5$ ), indicados na Tabela. I.

Com os resultados das simulações mostrados na Tabela I, podem-se obter os pesos  $C_i$  e ajustar a faixa para classificação de novas faltas. Os pesos  $C_b$ , obtidos a partir de (13), são mostrados na Tabela II. Pode-se observar que foram obtidos valores diferentes para os cinco pesos, sendo esta uma característica importante que diferencia os índices  $CM_F$  e  $CS_F$ . Resultados de estudos apresentados em [1] mostram que os índices que fornecem melhores informações sobre a estabilidade são exatamente  $ID_2$  e  $ID_5$ . Nota-se que os pesos relativos a estes índices possuem valores maiores, indicando que o índice composto proposto pode apresentar um bom desempenho.

TABELA I

ÍNDICES PARA O SISTEMA IEEE17, 40 CASOS, TEMPO DE SIMULAÇÃO = 2 s e tef = 0.28s.

| F  | BF  | L       | tcr (s) | $ID_1$ | $ID_2$ | $ID_3$ | $ID_4$ | $ID_5$ | E/I |
|----|-----|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|-----|
| 1  | 003 | 003-103 | 0.283   | 2.9    | 37.2   | 283.5  | 47.6   | 17.4   | E   |
| 2  | 015 | 015-063 | 0.31    | 2.7    | 28.7   | 235.4  | 38.0   | 4.1    | E   |
| 3  | 027 | 027-031 | 0.47    | 1.8    | 37.1   | 586.7  | 58.4   | 15.4   | E   |
| 4  | 027 | 027-127 | 0.47    | 1.8    | 37.7   | 593.6  | 59.1   | 15.9   | E   |
| 5  | 129 | 129-132 | 0.33    | 2.6    | 23.5   | 193.1  | 34.0   | 8.0    | E   |
| 6  | 018 | 018-037 | >0.5    | 1.0    | 3.5    | 5.5    | 4.5    | 0.9    | E   |
| 7  | 021 | 021-127 | >0.5    | 1.0    | 2.6    | 7.4    | 4.4    | 0.8    | E   |
| 8  | 016 | 016-126 | >0.5    | 1.0    | 2.7    | 8.0    | 4.5    | 0.8    | E   |
| 9  | 092 | 092-102 | >0.5    | 1.0    | 2.4    | 7.6    | 4.8    | 1.2    | E   |
| 10 | 032 | 032-033 | >0.5    | 1.0    | 3.5    | 7.0    | 4.9    | 1.0    | E   |
| 11 | 043 | 043-103 | >0.5    | 1.0    | 2.7    | 9.3    | 4.9    | 0.9    | E   |
| 12 | 041 | 041-081 | >0.5    | 1.0    | 2.8    | 7.8    | 5.2    | 1.5    | E   |
| 13 | 046 | 046-047 | >0.5    | 1.1    | 3.8    | 11.2   | 6.2    | 0.9    | E   |
| 14 | 089 | 089-086 | >0.5    | 1.1    | 3.4    | 10.7   | 5.9    | 1.3    | E   |
| 15 | 154 | 154-160 | >0.5    | 1.0    | 3.3    | 10.8   | 6.0    | 0.8    | E   |
| 16 | 103 | 103-124 | >0.5    | 1.0    | 1.6    | 13.6   | 5.4    | 0.5    | E   |
| 17 | 071 | 071-085 | >0.5    | 1.1    | 3.6    | 11.5   | 6.3    | 1.0    | E   |
| 18 | 059 | 059-061 | >0.5    | 1.1    | 4.3    | 13.9   | 7.0    | 0.9    | E   |
| 19 | 010 | 010-015 | >0.5    | 1.1    | 4.3    | 14.4   | 7.3    | 0.9    | E   |
| 20 | 062 | 062-126 | >0.5    | 1.1    | 5.1    | 15.7   | 7.7    | 1.2    | E   |
| 21 | 093 | 093-042 | 0.26    | 5.0    | 25.7   | 235.7  | 65.7   | 55.9   | I   |
| 22 | 110 | 110-112 | 0.26    | 9.1    | 15.2   | 204.9  | 28.0   | 152.0  | I   |
| 23 | 110 | 110-134 | 0.278   | 4.6    | 16.7   | 141.5  | 33.6   | 29.7   | I   |
| 24 | 001 | 001-003 | 0.17    | 8.4    | 232.9  | 771.2  | 168.3  | 505.3  | I   |
| 25 | 026 | 026-074 | 0.20    | 17.8   | 294.3  | 1.2    | 487.2  | 755.1  | I   |
| 27 | 149 | 149-026 | 0.22    | 12.9   | 74.8   | 436.2  | 152.1  | 339.0  | I   |
| 26 | 149 | 149-151 | 0.25    | 10.4   | 37.5   | 399.5  | 127.3  | 186.6  | I   |
| 27 | 149 | 149-152 | 0.25    | 10.9   | 38.5   | 485.4  | 181.5  | 219.5  | I   |
| 29 | 149 | 149-150 | 0.25    | 10.5   | 38.9   | 421.0  | 144.1  | 194.0  | I   |
| 30 | 112 | 112-120 | 0.21    | 15.7   | 142.8  | 590.1  | 190.7  | 865.2  | I   |
| 31 | 001 | 001-005 | 0.22    | 11.8   | 136.6  | 650.3  | 238.8  | 310.9  | I   |
| 32 | 005 | 005-120 | 0.23    | 13.3   | 121.5  | 704.9  | 220.2  | 385.5  | I   |
| 33 | 005 | 005-129 | 0.23    | 13.2   | 119.1  | 721.8  | 225.0  | 377.8  | I   |
| 34 | 001 | 001-004 | 0.23    | 10.3   | 122.4  | 406.2  | 104.5  | 312.7  | I   |
| 35 | 001 | 001-002 | 0.22    | 10.5   | 128.0  | 409.1  | 102.7  | 322.5  | I   |
| 36 | 120 | 120-129 | 0.26    | 8.7    | 40.3   | 357.0  | 84.4   | 265.0  | I   |
| 37 | 120 | 120-014 | 0.26    | 8.5    | 41.0   | 358.2  | 88.5   | 253.8  | I   |
| 38 | 096 | 096-100 | 0.24    | 15.6   | 14.0   | 136.1  | 45.2   | 436.7  | I   |
| 39 | 005 | 001-005 | 0.23    | 12.0   | 75.5   | 613.1  | 191.1  | 276.8  | I   |
| 40 | 112 | 110-112 | 0.24    | 15.5   | 138.1  | 914.0  | 300.9  | 568.4  | I   |

TABELA II

PESOS PARA OBTENÇÃO DE  $CS_F$  - IEEE17

| $C_1$ | $C_2$ | $C_3$ | $C_4$ | $C_5$ |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0.155 | 0.229 | 0.177 | 0.210 | 0.229 |

De posse dos coeficientes mostrados na Tabela II, podem-se determinar os valores de  $CS_F$ . A Tabela III mostra os valores obtidos para os índices compostos, para as faltas relacionadas da Tabela I.

Observando-se a Tabela III, notam-se valores pequenos, para  $CM_F$  e  $CS_F$ , para os casos estáveis (E) e valores maiores para os casos instáveis (I). Porém, não aparece uma divisão clara entre todos os casos E e I. Então, isto leva a necessidade da criação de uma faixa intermediária com casos E e I misturados. Assim, propõe-se, neste trabalho, uma classificação dos casos em três faixas: uma com casos estáveis; outra com casos instáveis; e uma terceira com os casos (denominados de potencialmente perigosos - PP) com os valores intermediários.

TABELA III  
VALORES DE CM E CS PARA AS CONTINGÊNCIAS DA TABELA I

| F  | $CM_F$ | $CS_F$ | F  | $CM_F$ | $CS_F$ |
|----|--------|--------|----|--------|--------|
| 1  | 0.1391 | 0.0673 | 21 | 0.1390 | 0.0980 |
| 2  | 0.1106 | 0.0471 | 22 | 0.1465 | 0.1352 |
| 3  | 0.2505 | 0.0715 | 23 | 0.0810 | 0.0551 |
| 4  | 0.2536 | 0.0726 | 24 | 0.6039 | 0.9450 |
| 5  | 0.0935 | 0.0437 | 25 | 1.0000 | 1.0000 |
| 6  | 0.0055 | 0.0065 | 26 | 0.6350 | 0.3757 |
| 7  | 0.0058 | 0.0058 | 27 | 0.2727 | 0.2338 |
| 8  | 0.0061 | 0.0059 | 28 | 0.3351 | 0.2892 |
| 9  | 0.0060 | 0.0062 | 29 | 0.2896 | 0.2498 |
| 10 | 0.0062 | 0.0068 | 30 | 0.6463 | 0.7917 |
| 11 | 0.0067 | 0.0062 | 31 | 0.4829 | 0.4492 |
| 12 | 0.0066 | 0.0069 | 32 | 0.5177 | 0.4784 |
| 13 | 0.0083 | 0.0078 | 33 | 0.5218 | 0.4745 |
| 14 | 0.0080 | 0.0077 | 34 | 0.3424 | 0.3586 |
| 15 | 0.0079 | 0.0073 | 35 | 0.3484 | 0.3679 |
| 16 | 0.0079 | 0.0056 | 36 | 0.2705 | 0.2596 |
| 17 | 0.0084 | 0.0078 | 37 | 0.2686 | 0.2549 |
| 18 | 0.0098 | 0.0087 | 38 | 0.2319 | 0.3379 |
| 19 | 0.0100 | 0.0088 | 39 | 0.4185 | 0.3581 |
| 20 | 0.0110 | 0.0098 | 40 | 0.6937 | 0.6601 |

Desta forma, uma proposta de classificação de contingências pode ser feita definindo-se primeiro a faixa de casos que serão considerados PP. A proposta de divisão das faixas é como segue:

- Limite superior para casos PP igual ao maior valor obtido para os casos estáveis. As Tabela I e Tabela III informam que este limite corresponde à falta nº 4.
- Limite inferior para casos PP igual ao menor valor obtido para os casos instáveis. As Tabelas I e III informam que este limite corresponde à falta nº 23.
- Os caso E e I são classificados em faixas estáveis e instáveis automaticamente.

A Tabela IV mostra as faixas para classificação das contingências.

TABELA IV  
FAIXA DE VALORES PARA CLASSIFICAÇÃO DOS ÍNDICES COMPOSTOS IEEE17

| Faixas de $CM_F$ e $CS_F$ |                              |  |                              |
|---------------------------|------------------------------|--|------------------------------|
|                           | E                            | PP   | I                            |
| $CM_F$                    | $CM_F < 0.0810 \pm \epsilon$ | $0.0810 \pm \epsilon \leq CM_F \leq 0.2536 \pm \epsilon$ | $CM_F > 0.2536 \pm \epsilon$ |
| $CS_F$                    | $CS_F < 0.0551 \pm \epsilon$ | $0.0551 \pm \epsilon \leq CS_F \leq 0.0726 \pm \epsilon$ | $CS_F > 0.0726 \pm \epsilon$ |

Observa-se que  $\epsilon$  é um parâmetro usado com o propósito de definir as faixas  $CM_F$  e  $CS_F$  com maior precisão, ou seja, permitindo ao usuário uma melhor escolha, de acordo com a experiência adquirida considerando o sistema sob análise.

Os casos classificados como PP podem ser marginais (marginalmente estáveis ou instáveis), alguns estáveis (principalmente, quando os ângulos dos rotores de alguns geradores apresentam grandes variações, Fig. 1) e por alguns instáveis. Destaca-se que as contingências classificadas como potencialmente perigosas representam casos que requerem cuidados especiais, como uma simulação por tempo maior. Assim, deve-se buscar uma maneira de classificar o menor número de casos como PP. A adoção de um  $\epsilon$  grande permite uma avaliação com mais segurança, porém com mais casos classificados na faixa PP. Neste trabalho,  $\epsilon$  foi arbitrado igual a zero.

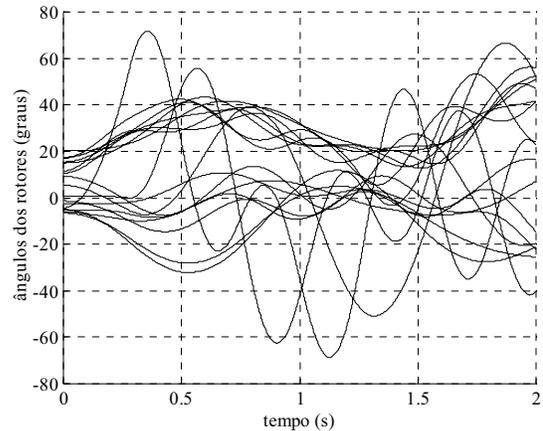


Fig. 1. Ângulos dos rotores em função do tempo para o sistema IEEE17, referente à falta de nº 3 da Tabela III.

De posse dos pesos indicados na Tabela II e das faixas de estabilidade mostradas na Tabela IV, pode-se determinar a severidade e, conseqüentemente, uma classificação para novas faltas.

Assim, foram realizadas simulações para 12 novas faltas no sistema IEEE17, sob as mesmas condições, obtendo os resultados relacionados na Tabela V.

A Fig. 2 mostra o correspondente desempenho dos índices compostos  $CM_F$  e  $CS_F$ . Pela Tabela V e Fig. 2, pode-se observar que foram distinguidos casos muito estáveis (faltas 1, 2, 3, 4 e 5), casos muito instáveis (faltas 9, 10, 11 e 12) e casos PP (faltas 6, 7, e 8). Observando-se os índices  $CM_F$  e  $CS_F$  na Tabela V, verifica-se que na coluna de  $CM_F$  existem casos PP, o que não ocorre na coluna de  $CS_F$ . Desta forma,  $CS_F$  mostra-se melhor que  $CM_F$ , pois classifica melhor as faltas. Numa avaliação mais minuciosa dos casos PP da Tabela V, verifica-se que estes casos são marginais, por apresentarem proximidades entre  $t_{ef}$  e  $t_{cr}$ , sendo marginalmente estável a falta 6, e marginalmente instáveis as faltas 7 e 8. Os índices  $CS_F$  indicam corretamente a estabilidade para estes casos, ou seja, classificando como estáveis ou instáveis. Pode-se observar também que nenhum caso estável é classificado pelos índices compostos como instável e vice-versa.

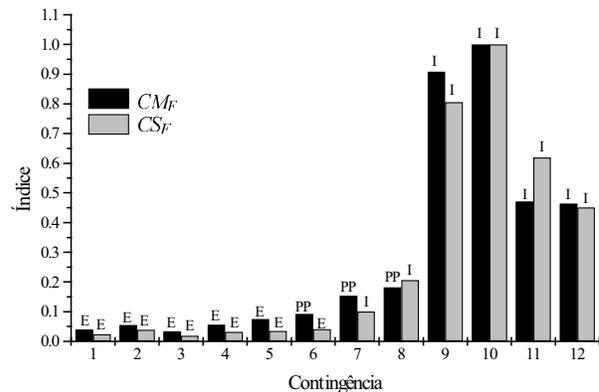


Fig. 2. Desempenho dos índices  $CM_F$  e  $CS_F$  para as contingências referidas na Tabela V.

TABELA V  
SISTEMA IEEE17, 12 NOVAS CONTINGÊNCIAS, TEMPO DE SIMULAÇÃO  $t_{ef} + 0.5s$ .

| F  | BF  | L       | LD | Tef (s) | tcr (s) | $ID_1$ | $ID_2$  | $ID_3$   | $ID_4$  | $ID_5$  | $CM_F$     | $CS_F$    | E/I |
|----|-----|---------|----|---------|---------|--------|---------|----------|---------|---------|------------|-----------|-----|
| 01 | 110 | 110-141 | S  | 0.20    | 0.282   | 1.926  | 6.571   | 73.399   | 15.816  | 12.553  | E(0.0395)  | E(0.0239) | E   |
| 02 | 110 | 110-141 | S  | 0.25    | 0.282   | 2.827  | 11.783  | 93.808   | 21.352  | 22.941  | E(0.0547)  | E(0.0384) | E   |
| 03 | 70  | 70-73   | N  | 0.15    | 0.254   | 1.492  | 5.809   | 65.105   | 13.143  | 8.406   | E(0.0336)  | E(0.0187) | E   |
| 04 | 70  | 70-73   | N  | 0.20    | 0.254   | 2.151  | 11.915  | 107.203  | 20.505  | 14.172  | E(0.0559)  | E(0.0315) | E   |
| 05 | 26  | 26-76   | N  | 0.18    | 0.207   | 2.292  | 16.800  | 155.361  | 26.816  | 8.013   | E(0.0750)  | E(0.0346) | E   |
| 06 | 70  | 70-73   | N  | 0.25    | 0.254   | 3.175  | 21.965  | 192.968  | 26.536  | 11.164  | PP(0.0916) | E(0.0407) | E   |
| 07 | 26  | 26-76   | N  | 0.21    | 0.207   | 4.311  | 25.149  | 271.595  | 77.573  | 51.175  | PP(0.1539) | I(0.1007) | I   |
| 08 | 110 | 110-141 | S  | 0.30    | 0.282   | 10.845 | 17.058  | 189.573  | 72.025  | 216.051 | PP(0.1811) | I(0.2059) | I   |
| 09 | 26  | 26-76   | N  | 0.25    | 0.207   | 14.696 | 258.887 | 1280.596 | 419.044 | 560.293 | I(0.9074)  | I(0.8059) | I   |
| 10 | 26  | 26-76   | N  | 0.30    | 0.207   | 19.559 | 359.938 | 1190.602 | 497.777 | 906.769 | I(1.0000)  | I(1.0000) | I   |
| 11 | 110 | 110-141 | S  | 0.40    | 0.282   | 20.500 | 46.795  | 371.067  | 130.664 | 746.570 | I(0.4712)  | I(0.6195) | I   |
| 12 | 26  | 70-73   | N  | 0.30    | 0.254   | 13.582 | 90.687  | 597.728  | 204.409 | 388.306 | I(0.4637)  | I(0.4506) | I   |

### B. Sistema Sul-brasileiro

Foram simuladas 40 contingências no sistema Sul-brasileiro (com uma configuração de 10 geradores [16]), a fim de obter os pesos e as faixas de classificação. A Tabela VI mostra os pesos e a Tabela VII mostra as faixas de coordenação.

TABELA VI  
PESOS PARA OBTENÇÃO DE  $CS_F$  - SUL-BRASILEIRO.

| $C_1$ | $C_2$ | $C_3$ | $C_4$ | $C_5$ |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0.057 | 0.244 | 0.245 | 0.214 | 0.239 |

TABELA VII  
FAIXA DE VALORES PARA CLASSIFICAÇÃO DOS ÍNDICES COMPOSTOS SUL-BRASILEIRO.

| Faixas de $CM_F$ e $CS_F$ |  |                              |
|---------------------------|--|------------------------------|
|                           | E  | I                            |
| $CM_F$                    | $CM_F < 0.0025 \pm \epsilon$                             | $CM_F \pm \epsilon > 0.0037$ |
| $CS_F$                    | $CS_F < 0.0058 \pm \epsilon$                             | $CS_F \pm \epsilon > 0.0076$ |
|                           | PP   |                              |
|                           | $0.0025 \pm \epsilon \leq CM_F \leq 0.0037 \pm \epsilon$ |                              |
|                           | $0.0058 \pm \epsilon \leq CS_F \leq 0.0076 \pm \epsilon$ |                              |

A Tabela VIII e a Fig. 3 mostram o desempenho dos índices  $CM_F$  e  $CS_F$  para classificar dez novas contingências. A contingência 8 foi classificada, por ambos os índices, como instável e as contingências 6, 7, 9 e 10 como potencialmente perigosas.

A simulação por um período maior mostrou que a falta 6 é marginalmente estável e as faltas 7, 9 e 10 são marginalmente instáveis.

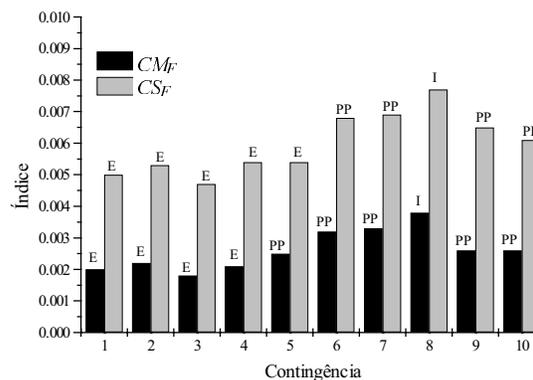


Fig. 3. Desempenho de  $CM_F$  e  $CS_F$  - Sul-brasileiro.

Semelhantemente ao sistema IEEE17, para este sistema verificou-se que:

- Nenhum caso estável é classificado como instável;
- Nenhum caso instável é classificado como estável;
- Os índices compostos apresentaram-se melhores que os índices individuais;
- A classificação de forma sistemática  $CS_F$  é melhor do que pela média  $CM_F$ , pois apresenta menor número de casos classificados como PP.

TABELA VIII  
10 CASOS DO SISTEMA SUL-BRASILEIRO, TEMPO DE SIMULAÇÃO =  $t_{ef} + 0.5s$

| F  | BF  | L       | LD | t <sub>ef</sub> (s) | t <sub>cr</sub> (s) | $ID_1$ | $ID_2$ | $ID_3$ | $ID_4$ | $ID_5$ | $CM_F$     | $CS_F$     | E/I |
|----|-----|---------|----|---------------------|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|------------|------------|-----|
| 01 | 432 | 432-430 | N  | 0.010               | 0.019               | 1.401  | 0.029  | 0.043  | 0.194  | 0.016  | E(0.0020)  | E(0.0050)  | E   |
| 02 | 432 | 432-430 | N  | 0.013               | 0.019               | 1.424  | 0.046  | 0.072  | 0.254  | 0.026  | E(0.0022)  | E(0.0053)  | E   |
| 03 | 375 | 375-382 | N  | 0.004               | 0.009               | 1.393  | 0.011  | 0.006  | 0.080  | 0.012  | E(0.0018)  | E(0.0047)  | E   |
| 04 | 375 | 375-382 | N  | 0.009               | 0.009               | 1.483  | 0.043  | 0.031  | 0.179  | 0.065  | E(0.0021)  | E(0.0054)  | E   |
| 05 | 368 | 368-370 | S  | 0.010               | 0.034               | 1.429  | 0.025  | 0.325  | 0.096  | 0.227  | PP(0.0025) | E(0.0054)  | E   |
| 06 | 368 | 368-370 | S  | 0.033               | 0.034               | 1.614  | 0.211  | 0.454  | 0.146  | 0.299  | PP(0.0032) | PP(0.0068) | E   |
| 07 | 368 | 368-370 | S  | 0.035               | 0.034               | 1.639  | 0.235  | 0.472  | 0.143  | 0.289  | PP(0.0033) | PP(0.0069) | I   |
| 08 | 368 | 368-370 | S  | 0.043               | 0.034               | 1.752  | 0.338  | 0.598  | 0.206  | 0.306  | I(0.0038)  | I(0.0077)  | I   |
| 09 | 375 | 375-382 | N  | 0.014               | 0.009               | 1.585  | 0.091  | 0.063  | 0.308  | 0.174  | PP(0.0026) | PP(0.0065) | I   |
| 10 | 375 | 432-430 | N  | 0.020               | 0.019               | 1.480  | 0.102  | 0.167  | 0.397  | 0.060  | PP(0.0026) | PP(0.0061) | I   |

## V. TEMPOS DE SIMULAÇÃO E PROCESSAMENTO

Quanto ao tempo de simulação envolvido no processo, pode-se observar que ele diminuiu consideravelmente, através do critério de parada ( $t_{ef}+0.5s$ ). Simulando-se a falta número 5 da Tabela VIII até 2 segundos, obtém-se um tempo de processamento de 4 segundos usando um computador Pentium IV, 1.8GHz com 512MB de RAM. O tempo de processamento cai para 1s quando a metodologia proposta é empregada.

## VI. CONCLUSÕES

Neste artigo foram apresentados dois índices compostos para classificação de contingência em análise de segurança dinâmica. O índice composto calculado pela média aritmética de cinco índices ( $CM_F$ ) foi inicialmente apresentado em [1], e o índice calculado de forma sistemática ( $CS_F$ ) é a proposta deste trabalho. A classificação das contingências com o método apresentado mostra-se bastante atrativa, merecendo os seguintes destaques:

- O critério de encerramento das simulações ( $t_{ef}+0.5s$ ) apresentado, conseguiu diminuir o tempo de processamento consideravelmente, dando rapidez ao processo de análise da estabilidade, o que é desejável para uma análise em tempo real;
- A calibragem sistemática dos índices mostrou-se eficiente dando confiabilidade e precisão ao índice composto;
- Nenhum caso estável é classificado pelos índices compostos, como instável e vice-versa;
- A composição de forma sistemática mostrou-se melhor que a composição pela média por apresentar um menor número de casos potencialmente perigosos nos dois sistemas analisados.
- Os casos classificados como potencialmente perigosos necessitam de ações para operar o sistema nestas condições, pois podem ser instáveis ou marginalmente estáveis.
- A metodologia requer um esforço inicial para obtenção dos pesos e dos valores das faixas de classificação, porém, isto é realizado uma vez para cada SEE e pode ser utilizado em diferentes condições de operação e para diferentes faltas.

A metodologia apresenta-se, portanto, bastante apropriada por permitir uma conclusão rápida sobre a estabilidade do sistema, e por ter possibilidades de ser incorporada com facilidade nos tradicionais programas computacionais de cálculo de estabilidade, usados pelos engenheiros de empresas do setor elétrico.

## VII. REFERÊNCIAS

- [1] C. Fu, and A. Bose, "Contingency Ranking Based on Severity Indices in Dynamic Security Analysis", IEEE Trans. On Power Systems, vol. 14, n.3, pp. 980-986, Ago., 1999.
- [2] E. F. Denis, "Análise da Estabilidade Transitória Através de um Método Híbrido", Dissertação de mestrado, Dept. de Engenharia Elétrica, FEIS-UNESP, Brasil, 1999.

- [3] O. C. Fernandes e, A. Padilha, "Índice de Estabilidade Transitória: Critérios de Ajustes a Partir de Simulação no Domínio do Tempo", XIV Congresso Brasileiro de Automática, Brasil, pp. 3185-3190, Set., 2002.
- [4] A. A. Fouad, and V. Vittal, "Power System Transient Stability Analysis Using the Transient Energy Function Method", New Jersey: Prentice Hall, 1992, p. 357.
- [5] M. Pai, "Power System Stability Analysis by the Direct Method of Lyapunov", New York: North Holland Publishing Company, 1981, p. 251.
- [6] M. Pavella, D. Ernst and D. Ruiz-Vega, "Transient Stability of Power Systems", Massachusetts: Kluwer Academic Publishers, 2000, p. 237.
- [7] V. Vittal, "Transient Stability Test Systems for Direct Stability Methods", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 7, n.1, pp. 37-42, Feb., 1992.
- [8] S. Vieira, and R. Hoffmann, "Elementos de Estatística", S. Paulo: Editora Atlas S.A., 1988, p. 159.
- [9] E. A. Bender, "Mathematical Methods in Artificial Intelligence", California: IEEE Computer Society Press, 1996, p. 636.
- [10] L. Wehenkel, "Machine-Learning Approaches to Power-System Security Assessment", IEEE Expert Intelligent Systems & Their Applications, pp. 60-72. 1997.
- [11] G. A. Carpenter, "Neural-Network Models of Learning And Memory: Leading Questions and an Emerging Framework", Trends in Cognitive Sciences, vol.5, Issue.3, pp. 114-118. Mar., 2001.
- [12] S. V. Kartalopoulos, "Understanding Neural Networks and Fuzzy Logic", New York: IEEE Press, 1996, p. 205.
- [13] S. Y. Kung, "Digital Neural Networks", New Jersey: PTR Prentice-Hall, 1993, p. 320.
- [14] S. Haykin, "Neural Networks: a Comprehensive Foundation", New Jersey: Prentice Hall, 1994, p. 842.
- [15] M. C. G. Silveira, A.D.P. Lotufo, and C. R. Minussi, "Transient Stability Analysis of Electrical Power Systems Using a Neural Network Based on Fuzzy ARTMAP", IEEE Bologna Power Tech 2003, Conference, p. 7.
- [16] C. R. Minussi "Controle de Segurança Dinâmica em Sistemas de Energia Elétrica", Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica – UFSC, Florianópolis – SC, Brasil, 1990.

## VIII. BIOGRAFIAS

**Edni Nunes de Oliveira**, Licenciatura plena em eletricidade, em 1990, pelo CEFET-GO/MG – Brasil, bacharelado e mestrado em Física, 1994 e 1998, respectivamente, pela UFG – Brasil. Atualmente é aluno de doutorado na Universidade Estadual Paulista – UNESP em Ilha Solteira Brasil e professor do CEFET –GO – Brasil.

**Antonio Padilha Feltrin** graduou-se em Eng. Elétrica pela UNIFEI-Itajubá- Brasil, concluiu mestrado e doutorado na UNICAMP Brasil e atualmente é professor adjunto na Universidade Estadual Paulista – UNESP em Ilha Solteira Brasil. A área de interesse é análise de sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica.

**Carlos R. Minussi** graduou-se em Engenharia Elétrica pela UFSM – Santa Maria – RS – Brasil, em 1978, e concluiu mestrado e doutorado, em Engenharia Elétrica, na UFSC – Florianópolis – SC – Brasil em 1981 e 1990, respectivamente. Atualmente é professor adjunto da Universidade Estadual Paulista – UNESP – Ilha Solteira – SP – Brasil. Área de atuação: análise, controle de segurança dinâmica, previsão de carga de sistemas de energia elétrica e redes neurais.