

Estudo da influência dos índices de severidade na segurança de um Sistema Eléctrico de Energia

C. I. Faustino Agreira¹, C. M. Machado Ferreira¹, J. A. Dias Pinto¹ e F. P. Maciel Barbosa²

¹Departamento de Engenharia Electrotécnica
ISEC, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra
Rua Pedro Nunes – Quinta da Nora, 3030-199 Coimbra (Portugal)
Telef: +351 239 790 200, fax: +351 239 790 201, e-mail: cif@isec.pt

²Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores
FEUP, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto (Portugal)
Telef: +351 22 508 14 00, fax: +351 22 508 14 43, e-mail: fmb@fe.up.pt

Resumo. Nos estudos de segurança são utilizados índices de desempenho que procuram traduzir correctamente o impacto de todas as contingências credíveis numa rede eléctrica. Nesta comunicação analisa-se a influência dos índices de severidade na avaliação da segurança de um Sistema Eléctrico de Energia, sendo propostos dois novos tipos de índices compostos. No primeiro são atribuídos factores multiplicativos iguais para cada índice individual, enquanto no segundo são atribuídos diferentes pesos, valorizando-se os melhores índices. Estes são determinados estatisticamente. O pacote de programas computacionais SECURsySTEM foi aplicado a uma rede de teste de 6 barramentos. Finalmente, são apresentadas algumas conclusões que permitem uma melhor compreensão da análise da segurança de um SEE.

Palavras-chave: Sistemas Eléctricos de Energia, Análise de Segurança, Filtragem e Ordenação de Contingências, Índices de Severidade

1. Introdução

O estudo e análise da segurança dos Sistemas Eléctricos de Energia (SEE) é um dos aspectos fundamentais a considerar na exploração e condução das redes eléctricas, pois permite conhecer o comportamento do sistema após a ocorrência de uma contingência [1]. À medida que os sistemas vão crescendo, a manutenção dos valores das tensões dentro dos limites pré-estabelecidos, em vários pontos da rede, nomeadamente quando ocorrem contingências, assume progressivamente uma maior importância.

Atendendo à grande dimensão das redes de transporte, às interligações com outros sistemas e ao interesse em quantificar a segurança em tempos reduzidos, bem como à não linearidade das equações do trânsito de potências, recorre-se habitualmente a uma primeira selecção de contingências, utilizando um processo aproximado e, posteriormente utilizando um método mais preciso, são analisadas as contingências críticas e potencialmente críticas.

Os objectivos que determinam a definição de uma metodologia para a selecção das contingências críticas, são fundamentalmente a identificação das contingências que podem originar problemas na exploração do sistema e a necessidade de evitar a avaliação do impacto de todas as contingências, atendendo à sua impossível realização prática.

Na realidade este último objectivo é muito importante porque, atendendo às diferentes combinações possíveis da rede de transporte com o sistema de produção e às variações do consumo, o número de estados possível será extremamente elevado. A dificuldade que se coloca em relação aos métodos que têm sido propostos para a selecção de contingências, consiste em saber se essas formulações seleccionam ou não todas as contingências severas e, se por outro lado, as contingências irrelevantes são seleccionadas ou não [1].

No estudo e análise de contingências há que ter em conta algumas características importantes, como a classificação das contingências, a precisão, a fiabilidade e a eficiência computacional. A análise de contingências é assim realizada utilizando-se índices de severidade.

Os índices individuais, apresentam normalmente bons resultados para situações particulares, mas podem ser usados em casos gerais, dependendo de alguns factores, tais como: dimensão do sistema, tipo de perturbação e configuração topológica. A experiência de implementação com sucesso da classificação das contingências em tempo real, permite concluir que a utilização dos índices compostos é a melhor solução. Um índice composto permite uma avaliação global dos diferentes aspectos dos SEE, enquanto que um índice individual poderá não ordenar da melhor forma as contingências do Sistema Eléctrico de Energia em estudo. Os índices compostos foram calculados atribuindo pesos diferentes a cada índice individual, adicionando depois todas as parcelas [2].

Nesta comunicação são propostos dois novos tipos de pesos para comparação. No primeiro caso, os pesos são escolhidos, de tal forma que o índice composto (*CM*) é a média dos índices individuais, isto é, são atribuídos pesos iguais para os índices globais de severidade, quer para os índices de severidade relativos à tensão e à potência, quer para os índices de severidades relativos às perdas. Neste caso os pesos são iguais à unidade. No segundo caso para obtenção do índice composto (*CS*), os pesos foram calculados de modo a privilegiar os índices que obtiveram melhores resultados. Os melhores índices são aqueles que para um conjunto de contingências apresentam uma maior dispersão entre os seus componentes. Os seus pesos podem ser obtidos de forma sistemática para um Sistema Eléctrico de Energia a partir de um tratamento estatístico dos dados. São diferentes os pesos para cada índice parcial relativos à tensão e à potência e para cada índice parcial relativos às perdas. O pacote de programas computacionais desenvolvido o SECURsyTEM, foi aplicado à análise da segurança de uma rede de teste com 6 barramentos [3]. Finalmente, são apresentadas algumas conclusões que permitem uma melhor compreensão da análise da segurança de um SEE.

2. Formulação do Problema

A. Índices Individuais

Os índices de severidade, usualmente, utilizados para avaliar o impacto das sobrecargas e das violações dos limites de tensão nos diferentes barramentos do sistema que são determinados por:

$$\eta_p = \sum_{i=1}^{n_r} \omega_{pk} \left(\frac{P_k}{P_k^{\max}} \right)^{2m} \quad (1)$$

com

- η_p - índice de severidade relativo à potência
- ω_{pk} - peso para a potência activa do ramo k
- P_k - potência activa no ramo k
- P_k^{\max} - capacidade máxima do ramo k
- m - expoente a especificar
- n_r - número de ramos da rede eléctrica

$$\eta_v = \sum_{i=1}^{n_b} \omega_{vi} \left(\frac{V_i - V_i^{\text{esp}}}{\Delta V_i^{\text{lim}}} \right)^{2m} \quad (2)$$

sendo

- η_v - índice de severidade relativo à tensão
- ω_{vi} - factor peso para a tensão no barramento i
- V_i - módulo da tensão no barramento i
- V_i^{esp} - valor especificado ou nominal da tensão no barramento i
- ΔV_i^{\max} - desvio máximo de tensão permitido no barramento i
- n_b - número de barramentos do sistema

Os factores de peso das expressões (1) e (2) têm em conta a importância dos diferentes componentes do sistema. Estes parâmetros são escolhidos com base na experiência dos operadores e reflectem o impacto das diferentes violações nas condições de funcionamento do sistema [1].

Recentemente, foram propostos novos índices de severidade baseados nas perdas activas do sistema [4], [5]. Estes índices são calculados através da decomposição das perdas de potência activa em duas componentes, sensíveis a diferentes variáveis de estado, exibindo um comportamento similar ao acoplamento $P-\delta$ e $Q-V$ do Sistema de Energia Eléctrica. Esta importante característica possibilita a sua utilização como variáveis de medida das sobrecargas de potência activa e das violações dos limites de tensão nos barramentos. Nesta formulação o factor de peso e o expoente não são tidos em consideração. Os índices de severidade baseados nas perdas activas do sistema são determinados através das seguintes expressões:

$$P_{LV} = \sum_{i=1}^{n_b-1} \sum_{k=i+1}^{n_b} - \left[G_{ik} (V_i - V_k)^2 \right] \quad (3)$$

$$P_{L\delta} = \sum_{i=1}^{n_b-1} \sum_{k=i+1}^{n_b} - \left[G_{ik} V_i V_k (\delta_i - \delta_k)^2 \right] \quad (4)$$

em que

- P_{LV} - índice de severidade da potência associado à amplitude da tensão
- $P_{L\delta}$ - índice de severidade associado à fase da tensão
- G_{ik} - condutância do ramo ik
- δ_i - ângulo de fase do barramento i
- δ_k - ângulo de fase do barramento k

A expressão (3) que abrange uma pequena componente das perdas é apenas sensível à amplitude das tensões nos barramentos. Por isso, o seu cálculo é basicamente influenciado pelo trânsito de potência reactiva. A expressão é ainda usada para medir as violações das tensões nos barramentos, bem como para calcular os correspondentes índices de severidade.

A segunda componente das perdas dada pela expressão (4) é muito sensível aos valores de fase da tensão dos barramentos, pelo que o seu cálculo é efectuado utilizando um trânsito de potências activas. A equação (4) permite ainda calcular as sobrecargas nas linhas de transmissão de energia eléctrica. Pode ainda ser utilizada para calcular os correspondentes índice de severidade. Em ambos os casos, os índices de severidade individuais podem ser combinados, permitindo assim determinar índices globais [6].

B. Índices Compostos

A classificação e ordenação das contingências foi feita a partir de índices compostos que foram obtidos

através dos índices de severidade. Os índices compostos podem ser obtidos de duas maneiras diferentes. Através da média aritmética dos índices individuais, isto é, atribuindo factores multiplicativos iguais para cada índice individual, ou atribuindo diferentes pesos, valorizando os melhores índices, os quais são determinados de forma estatística [2].

O grau de dispersão de um conjunto de dados pode ser medido pelos desvios dos valores obtidos em relação à média. Entende-se por desvio em relação à média, a diferença entre o valor observado e a média do conjunto de dados. Como cada valor possui um desvio em relação à média, para obter o grau de dispersão de todo o conjunto de dados, é necessário calcular todos os desvios. A soma dos desvios não pode ser usada como medida de dispersão, dado que a sua soma é igual a zero, pois os desvios com sinais positivos e negativos compensam-se. Este problema pode ser contornado se, em lugar da soma dos desvios for considerada 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 se define 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 estudo a variância foi calculada desta maneira. Como medida de dispersão, a variância apresenta a desvantagem de ter uma unidade de medida, igual ao quadrado da unidade de medida dos dados. Define-se como medida de dispersão 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 tal como a variância, mede a dispersão dos dados, mas possui a vantagem de usar a mesma unidade de medida dos dados.

Determina-se assim um valor para a dispersão relativa, isto é, de dispersão em relação à média. Para medir a dispersão relativa usa-se o coeficiente de variação. O Coeficiente de Variação (CV) é a razão entre o desvio padrão s e a média aritmética \bar{x} , multiplicada por 100. O coeficiente de variação para cada índice é dado em percentagem e pode ser calculado por:

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} \times 100 \quad (5)$$

Os valores dos coeficientes de variação confirmam que a dispersão dos dados em relação à média é muito importante no primeiro índice e pouco no segundo. Deste modo, cada peso pode ser determinado pela divisão do CV_i de cada índice pelo somatório dos CV_i em que $i = 1, 2, \dots, NI$:

$$C_i = \frac{CV_i}{\sum_{i=1}^{NI} CV_i} \quad (6)$$

sendo NI o número de índices. O índice composto, para uma determinada contingência C (CS_C) é obtido pelo somatório da multiplicação de cada coeficiente C_i , através da equação (6), com os respectivos componentes dos índices $(ID_i)_C$, com $i = 1, \dots, NI$:

$$CS_C = \sum_{i=1}^{NI} C_i \times (ID_i)_C \quad (7)$$

Neste estudo, através da equação 5, um CV , foi obtido para cada conjunto de índices de severidade parciais e a partir da equação (6), são calculados os pesos (C_1, C_2, C_3 e C_4), em que:

- C_1 - é o peso relativo ao índice de severidade parcial da tensão, dos índices de severidade relativos à tensão e à potência.
- C_2 - é o peso relativo ao índice de severidade parcial da potência, dos índices de severidade relativos à tensão e à potência.
- C_3 - é o peso relativo ao índice de severidade parcial da potência associado à amplitude da tensão, dos índices de severidade relativos às perdas.
- C_4 - é o peso relativo ao índice de severidade parcial índice de severidade associado à fase da tensão, dos índices de severidade relativos às perdas.

Estes pesos foram utilizados na equação (7) para obtenção do índice composto, para uma determinada contingência C (CS_C), para avaliação das diferentes contingências que ocorrem num Sistema Eléctrico de Energia

3. Exemplo de Aplicação

O estudo desenvolvido foi aplicado na análise da segurança da rede de teste do IEEE com 6 barramentos, 3 geradores, 11 linhas e 3 cargas. Cada contingência simulada consistiu na saída de serviço de um dos componentes do sistema. Nas simulações realizadas foram utilizados índices de severidade normalizados.

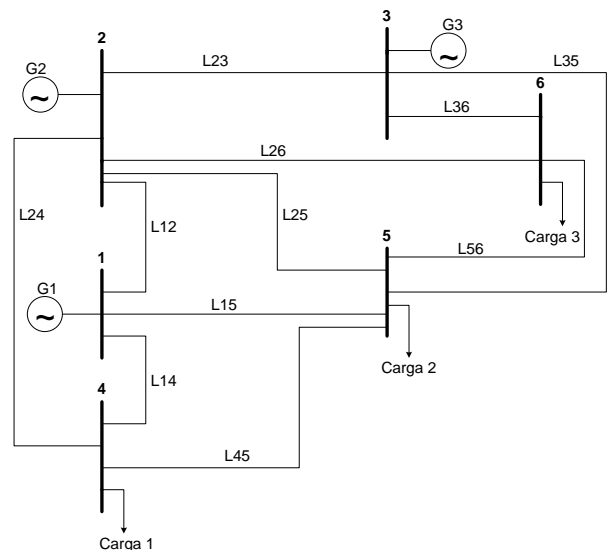


Fig. 1. Esquema unifilar da rede de teste de seis barramentos

4. Resultados

A. Resultados relativos aos índices individuais

Nas tabelas 1 e 2 mostram-se os resultados obtidos, para o conjunto de índices de severidade relativos à tensão (η_v) e à potência (η_p), bem como o índice global ($\eta_v + \eta_p$) e a classificação das contingências através do uso destes índices de severidade [1]. Os valores dos índices foram todos normalizados. As contingências provocadas pelas saídas das linhas 3-6, 2-4, 1-4 e 2-6 são classificadas como críticas. As contingências 1-5, 2-5, 3-5 e 4-5 são classificadas de potencialmente críticas e as restantes contingências, como a saída das linhas 5-6, 2-3 e 1-2, como não críticas.

Quanto às contingências provocadas pela saída dos geradores, verifica-se que a saída de serviço do gerador no. 3 provoca nas linhas uma sobrecarga elevada, sendo o valor do índice de severidade global também elevado, pelo que esta contingência é classificada como crítica. Nas tabelas 3 e 4 mostram-se os resultados obtidos, para o conjunto de índices de severidade relativos às perdas, o P_{LV} e o $P_{L\delta}$ [4], [5].

O índice global $P_{LV} + P_{L\delta}$ e a classificação das contingências são obtidos através do uso deste conjunto de índices. Os valores dos índices foram todos normalizados.

Classificando as contingências com este conjunto de índices verifica-se que, as contingências provocadas pelas saídas das linhas 3-6, 2-4, 1-5 e 2-4 são classificadas como críticas. As contingências 2-5, 2-6, 3-5 e 4-5 são classificadas de potencialmente críticas e as restantes contingências, como a saída das linhas 5-6, 1-2 e 2-3 de não críticas. Quanto às contingências provocadas pela saída dos geradores, verifica-se que a saída de serviço do gerador no. 3 é definitivamente crítica.

B. Resultados relativos aos índices compostos

Os índices utilizados foram obtidos conforme descrito na secção 2.B. Os valores dos pesos utilizados para cada índice parcial são indicados nas tabelas 5 e 6, para as linhas de transmissão e para os geradores respectivamente.

Tabela 5 - Pesos para obtenção do índice composto das contingências nas linhas de transmissão

Pesos para obtenção do índice composto			
$C\eta_v$	$C\eta_p$	$C P_{LV}$	$C P_{L\delta}$
0.122	0.619	0.109	0.149

Tabela 6 - Pesos para obtenção do índice composto das contingências nos geradores

Pesos para obtenção do índice composto			
$C\eta_v$	$C\eta_p$	$C P_{LV}$	$C P_{L\delta}$
0.25	0.25	0.25	0.25

Nas tabelas 7 e 8 mostram-se os resultados obtidos para as linhas de transmissão e para os geradores através dos índices compostos. Estes resultados foram obtidos através de uma lista inicial de contingências.

Analisando a tabela 7, conclui-se que para os geradores os valores dos índices compostos obtidos são idênticos, levando a uma ordenação e classificação similar à obtida para os índices individuais, onde os pesos usados são todos iguais e de valor igual à unidade.

As listas de contingências para classificação nos vários módulos do programa computacional SECURsySTEM foram obtidas através do cálculo dos índices de severidade [3], [8]. A gama de valores considerados para dividir as regiões das contingências consideradas foi o mesmo em todos os módulos e podem ser visualizados nas tabelas 9 e 10.

Tabela 1 – Resultados obtidos relativamente aos índices de severidade $\eta_v + \eta_p$ com a saída de serviço das linhas de transmissão.

I		II		III		IV		V		VI		VII		VIII		IX		X		XI		XII	
Saída de Linha		η_v				Saída de Linha		η_p				Saída de Linha		$\eta_v + \eta_p$									
<i>i</i>	<i>j</i>	Normalizado	Classificação	<i>i</i>	<i>j</i>	Normalizado	Classificação	<i>i</i>	<i>j</i>	Normalizado	Classificação	<i>i</i>	<i>j</i>	Normalizado	Classificação	<i>i</i>	<i>j</i>	Normalizado	Classificação	<i>i</i>	<i>j</i>	Normalizado	Classificação
3	6	1.61	1	3	6	4.11	1	3	6	1.64	1	3	6	1.64	1	3	6	1.64	1	3	6	1.64	1
1	4	1.32	2	2	4	3.62	2	2	4	1.31	2	2	4	1.31	2	2	4	1.31	2	2	4	1.31	2
1	5	1.30	3	1	4	0.82	3	1	4	1.29	3	1	4	1.29	3	1	4	1.29	3	1	4	1.29	3
2	4	1.00	4	3	5	0.69	4	2	6	1.04	4	2	6	1.04	4	2	6	1.04	4	2	6	1.04	4
2	6	0.93	5	1	5	0.54	5	1	5	0.92	5	1	5	0.92	5	1	5	0.92	5	1	5	0.92	5
2	5	0.89	6	2	5	0.46	6	2	5	0.87	6	2	5	0.87	6	2	5	0.87	6	2	5	0.87	6
4	5	0.82	7	2	6	0.22	7	3	5	0.82	7	3	5	0.82	7	3	5	0.82	7	3	5	0.82	7
3	5	0.81	8	5	6	0.20	8	4	5	0.81	8	4	5	0.81	8	4	5	0.81	8	4	5	0.81	8
5	6	0.80	9	4	5	0.15	9	5	6	0.80	9	5	6	0.80	9	5	6	0.80	9	5	6	0.80	9
2	3	0.76	10	2	3	0.10	10	2	3	0.75	10	2	3	0.75	10	2	3	0.75	10	2	3	0.75	10
1	2	0.75	11	1	2	0.09	11	1	2	0.74	11	1	2	0.74	11	1	2	0.74	11	1	2	0.74	11

Tabela 2 – Resultados obtidos relativamente aos índices de severidade $\eta_v + \eta_p$ com a saída de serviço dos geradores

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Saída de Gerador	η_v		Saída de Gerador	η_p		Saída de Gerador	$\eta_v + \eta_p$	
Nº	Normalizado	Classificação	Nº	Normalizado	Classificação	Nº	Normalizado	Classificação
3	1.18	1	3	1.75	1	3	1.19	1
2	0.96	2	2	0.79	2	2	0.95	2
1	0.87	3	1	0.46	3	1	0.86	3

Tabela 3 – Resultados obtidos relativamente aos índices de severidade $P_{LV} + P_{L\delta}$ com a saída de serviço das linhas de transmissão

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Saída de Linha		P_{LV}		Saída de Linha		$P_{L\delta}$		Saída de Linha		$P_{LV} + P_{L\delta}$	
<i>i</i>	<i>j</i>	Normalizado	Classificação	<i>i</i>	<i>j</i>	Normalizado	Classificação	<i>i</i>	<i>j</i>	Normalizado	Classificação
3	6	1.62	1	1	4	1.78	1	3	6	1.45	1
2	4	1.21	2	1	5	1.53	2	1	4	1.40	2
1	4	1.18	3	3	6	1.16	3	1	5	1.21	3
1	5	1.01	4	2	6	0.91	4	2	4	1.05	4
2	5	0.96	5	1	2	0.90	5	2	5	0.91	5
3	5	0.90	6	2	5	0.81	6	2	6	0.88	6
2	6	0.87	7	2	3	0.80	7	3	5	0.85	7
4	5	0.85	8	4	5	0.79	8	4	5	0.83	8
5	6	0.84	9	5	6	0.78	9	5	6	0.82	9
2	3	0.78	10	3	5	0.77	10	1	2	0.82	10
1	2	0.77	11	2	4	0.77	11	2	3	0.79	11

Tabela 4 – Resultados obtidos relativamente aos índices de severidade $P_{LV} + P_{L\delta}$ com a saída de serviço dos geradores

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Saída de Gerador	P_{LV}		Saída de Gerador	$P_{L\delta}$		Saída de Gerador	$P_{LV} + P_{L\delta}$	
Nº	Normalizado	Classificação	Nº	Normalizado	Classificação	Nº	Normalizado	Classificação
3	1.06	1	3	1.24	1	3	1.08	1
1	1.01	2	2	0.99	2	1	0.97	2
2	0.94	3	1	0.76	3	2	0.95	3

Tabela 7 – Resultados obtidos relativamente aos índices compostos com a saída de serviço das linhas de transmissão

Valores dos índices compostos para as Linhas de Transmissão					
Saída de Linha		$C\eta_v$	$C\eta_p$	CP_{LV}	$CP_{L\delta}$
<i>i</i>	<i>j</i>				
1	2	0.09183	0.05575	0.08372	0.13440
1	4	0.16161	0.50799	0.12830	0.26582
1	5	0.15917	0.33453	0.10982	0.22849
2	3	0.09305	0.06195	0.08481	0.11947
2	4	0.12244	2.24257	0.13156	0.11499
2	5	0.10897	0.28497	0.10438	0.12096
2	6	0.11386	0.13629	0.09460	0.13590
3	5	0.09917	0.42745	0.09786	0.11499
3	6	0.19712	2.54613	0.17614	0.17323
4	5	0.10040	0.09292	0.09242	0.11798
5	6	0.09795	0.12390	0.09133	0.11648

Tabela 8 – Resultados obtidos relativamente aos índices compostos com a saída de serviço dos Geradores

Valores dos índices compostos para os Geradores				
Saída de Gerador	$C\eta_v$	$C\eta_p$	CP_{LV}	$CP_{L\delta}$
No.				
1	0.21723	0.11505	0.25218	0.19040
2	0.23970	0.19758	0.23471	0.24802
3	0.29463	0.43768	0.26467	0.31065

Relativamente às tabelas 7 e 8, conclui-se que os índices compostos obtidos possuem valores pequenos, para as contingências não críticas e valores mais elevados para as contingências críticas. Verifica-se ainda, que não existe uma divisão clara entre todas as contingências. Surgiu assim, a necessidade de criar uma faixa intermédia, entre as contingências críticas e as não críticas. A faixa intermédia considerada engloba então as contingências potencialmente críticas.

A classificação das contingências foi realizada definindo primeiro a zona de casos que engloba as contingências potencialmente críticas. A divisão foi efectuada do seguinte modo:

- Limite superior para as contingências potencialmente críticas igual ao menor valor obtido para as contingências críticas.
- Limite inferior para as contingências potencialmente críticas igual ao maior valor obtido para as contingências não críticas.

As tabelas 9 e 10 mostram as regiões de valores, para a classificação dos índices compostos usados para

ordenação e classificação das contingências, nas Linhas de Transmissão e nos Geradores respectivamente.

O parâmetro ϵ é usado com o propósito de definir as faixas para os índices $C\eta_v$, $C\eta_p$, CP_{LV} e $CP_{L\delta}$ com maior precisão, permitindo assim uma melhor escolha, de acordo com a experiência adquirida e considerando o sistema em análise.

As contingências classificadas como potencialmente críticas representam casos que requerem cuidados especiais, como a simulação para outros pontos de operação, pelo que se deve classificar o menor número de casos como potencialmente críticos.

Tabela 9 – Faixa de valores para classificação dos índices compostos nas Linhas de Transmissão.

Regiões de Valores para Classificação dos Índices compostos.			
Pesos	Não Críticas	Provavelmente Críticas	Críticas
$C\eta_v$	$C\eta_v < 0.09917 \pm \epsilon$	$0.09917 \pm \epsilon \leq C\eta_v \leq 0.11386 \pm \epsilon$	$C\eta_v > 0.11386 \pm \epsilon$
$C\eta_p$	$C\eta_p < 0.12390 \pm \epsilon$	$0.12390 \pm \epsilon \leq C\eta_p \leq 0.33453 \pm \epsilon$	$C\eta_p > 0.33453 \pm \epsilon$
CP_{LV}	$CP_{LV} < 0.08481 \pm \epsilon$	$0.08481 \pm \epsilon \leq CP_{LV} \leq 0.10438 \pm \epsilon$	$CP_{LV} > 0.10438 \pm \epsilon$
$CP_{L\delta}$	$CP_{L\delta} < 0.11648 \pm \epsilon$	$0.11648 \pm \epsilon \leq CP_{L\delta} \leq 0.13440 \pm \epsilon$	$CP_{L\delta} > 0.13440 \pm \epsilon$

Tabela 10 – Faixa de valores para classificação dos índices compostos nos Geradores.

Regiões de Valores para Classificação dos Índices compostos.			
Pesos	Não Críticas	Provavelmente Críticas	Críticas
$C\eta_v$	$C\eta_v < 0.21723 \pm \epsilon$	$0.21723 \pm \epsilon \leq C\eta_v \leq 0.23970 \pm \epsilon$	$C\eta_v > 0.23970 \pm \epsilon$
$C\eta_p$	$C\eta_p < 0.11505 \pm \epsilon$	$0.11505 \pm \epsilon \leq C\eta_p \leq 0.19758 \pm \epsilon$	$C\eta_p > 0.19758 \pm \epsilon$
CP_{LV}	$CP_{LV} < 0.23471 \pm \epsilon$	$0.23471 \pm \epsilon \leq CP_{LV} \leq 0.25218 \pm \epsilon$	$CP_{LV} > 0.25218 \pm \epsilon$
$CP_{L\delta}$	$CP_{L\delta} < 0.19040 \pm \epsilon$	$0.19040 \pm \epsilon \leq CP_{L\delta} \leq 0.24802 \pm \epsilon$	$CP_{L\delta} > 0.24802 \pm \epsilon$

A utilização de um parâmetro ϵ , com um valor elevado permite uma classificação com maior segurança, contudo o número de casos classificados como potencialmente críticos torna-se maior. Neste estudo, o parâmetro ϵ foi arbitrado igual a zero.

A tabela 9 mostra que o limite superior para as contingências provavelmente críticas, que é igual ao menor valor obtido para as contingências críticas, corresponde à saída de serviço da linha de transmissão 2-6. O limite inferior para as contingências provavelmente críticas que é igual ao maior valor obtido para as contingências não críticas, é dado pela saída de serviço da linha de transmissão 3-5.

A tabela 10 mostra o limite superior para as contingências provavelmente críticas, que é igual ao menor valor obtido para as contingências críticas, corresponde à saída de serviço do gerador 2. O limite inferior para as contingências provavelmente críticas, que é igual ao maior valor obtido para as contingências não críticas, é dado pela saída de serviço do gerador 1.

A classificação e ordenação das contingências através dos índices compostos permite obter uma

classificação diferente da que foi obtida com o uso de índices individuais.

Para as linhas de transmissão verifica-se que a classificação das contingências através dos índices individuais e dos índices compostos não é a mesma. Das 11 contingências que constituem a lista inicial das contingências críticas, 4 foram classificadas como críticas, 4 como provavelmente críticas e 3 contingências como não críticas.

Quanto aos geradores, como todos os pesos são idênticos, a classificação deveria ser a mesma, quer para os índices individuais, quer para os índices compostos, mas a divisão por faixas permite obter uma classificação diferente. Das 3 contingências iniciais, 1 foi classificada como crítica, 2 como provavelmente críticas e 0 como não críticas.

Os índices parciais que apresentam valores de peso mais elevados para as linhas de transmissão são o $C\eta_p$ e o $CP_{L\delta}$, o que significa que o índice composto proposto apresenta um bom desempenho.

5. Conclusões

Nesta comunicação foram apresentados os resultados do impacto dos índices de severidade no estudo e análise da segurança de um Sistema Eléctrico de Energia. A formulação desenvolvida foi aplicada à rede de teste de 6 barramentos. Foram apresentados os dois conjuntos de índices de severidade os primeiros relativos à tensão e à potência e os segundos relativos às perdas. Estes índices foram usados no estudo e análise de contingências, para avaliar o impacto das sobrecargas e da violação dos limites de tensão nos diferentes barramentos do sistema. Por fim, foi apresentada a metodologia usada para a ordenação e classificação das contingências, baseada em índices compostos, obtidos através da combinação ponderada dos índices de severidade individuais. A metodologia proposta é precisa, flexível e eficiente, dado que permite a simulação de vários cenários de contingência. A utilização dos conjuntos de índices de severidade conduziu a alterações na ordenação e classificação das contingências, pelo que a metodologia proposta permite implementar facilmente medidas de controlo preventivas no âmbito da segurança dos Sistemas Eléctricos de Energia.

Referências

- [1] A. J. Wood e B. F. Wollenberg, *Power Generation Operation and Control*, 2nd Ed., Wiley, New York (1996).
- [2] E. N. Oliveira, A. Padilha e C. R. Minussi, “Utilização de Índices de Estabilidade Transitória para a Avaliação de Segurança Dinâmica”, *Revista do IEEE América Latina*, Vol. 1, Outubro de 2003, Disponível online: www.ewh.ieee.org/reg/9/etrans/
- [3] C. I. Faustino Agreira, C. M. Machado Ferreira, J. A. Dias Pinto e F. P. Maciel Barbosa, “Contingency screening and Ranking algorithm using two different sets of security performance indices”, in *Proc. IEEE Bologna Powertech*, Junho de 2003.
- [4] R. Çaglar, A. Özdemir e F. Mekiç, “Contingency selection based on real power transmission losses”, in *Proc. IEEE International Conference on Electric Power Engineering, PowerTech 1999*, Budapest, Hungary, CD-ROM.
- [5] R. Çaglar e A. Ozdemir, “Composite Electric Power System Adequacy Evaluation Via Transmission Losses Based Contingency selection Algorithm”, in *Proc. IEEE International Conference on Electric Power Engineering, Power Tech 1999*, Budapest, Hungary, CD-ROM.
- [6] C. I. Faustino Agreira, C. M. Machado Ferreira, J. A. Dias Pinto e F. P. Maciel Barbosa, “Efficient contingency filtering and ranking algorithm for steady-state security analysis of an Electric Power System”, in *Proc. International Universities Power Engineering Conference, UPEC 2002*, CD-ROM.
- [7] C. I. Faustino Agreira, C. M. Machado Ferreira, J. A. Dias Pinto e F. P. Maciel Barbosa, “Steady-state Security Analysis of an Electric Power System Using a New Contingency Filtering and Ranking Technique”, in *Proc. Nordic and Baltic Workshop on Power Systems*, Tampere, Finlândia, Fevereiro de 2002, Disponível online: <http://butler.cc.tut.fi/~repo/workshop.html>
- [8] Agreira Faustino I. C., Ferreira Machado C. M., Pinto Dias J. A. e Barbosa Maciel F. P., “Contingency Screening and Ranking Assessment of an Electric Power System using Different Security Performance Indices”, in *Proc. of the 8^o Congresso Luso-Espanhol de Engenharia Electrotécnica, CLEEE 2003*, Vilamoura, Julho de 2003.