

UM ESTUDO COMPARATIVO DE METODOLOGIAS PARA ANÁLISE DE CONTINGÊNCIAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

GEOVANE M. LENTZ¹, DIOGO MARUJO¹, DENISSON Q. OLIVEIRA², CRISTIANE L. ZEFERINO¹,
BRUNO N. NASCIMENTO³, FRANCISCO M. PORTELINHA JR³

¹*Universidade Tecnológica Federal do Paraná*
Avenida Brasil, 4232, Parque Independência, 85884-000, Medianeira, PR, Brasil
E-mails: geovanelentz@gmail.com, diogomarujo@utfpr.edu.br,
cristianel@utfpr.edu.br

²*Universidade Federal do Maranhão*
Av. dos Portugueses, 1966, Vila Bacanga, 65080-805, São Luís, MA, Brasil
E-mails: denissonqo@gmail.com

³*Universidade Federal de Itajubá*
Av. BPS, 1303, Pinheirinho, 37500-903, Itajubá - MG, Brasil
E-mails: nadaibruno@gmail.com, portelinha@gmail.com

Abstract— Among the several approaches to study the electric power systems, the contingencies analysis has great prominence. This approach is important in both the planning and operating stages. In order to help system operators take control actions in the event of contingencies, off-line studies are conducted, in order to obtain a ranking of the most critical contingencies. This article aims to compare some methodologies for the classification of critical contingencies in electric power systems, identifying which methods have similarities and which approaches present divergent results. Some of the methodologies for automatically classifying contingencies were implemented in MATLAB. Tests were carried out considering the IEEE 14 and 57 buses.

Keywords— Power System Stability, Contingency Screening, Electric Power System, Performance Index, PV Curve, Continuation Method.

Resumo— Dentre as diversas abordagens existentes para o estudo de sistemas elétricos de potência, destaca-se a análise de contingências. Este enfoque é importante tanto nas etapas de planejamento quanto de operação dos sistemas. Para que os operadores do sistema tenham noção das medidas de controle que devem realizar caso alguma dessas contingências ocorra, são realizados estudos *off-line*, tal que se obtenha um *ranking* das contingências mais críticas. Este artigo tem como finalidade realizar a comparação de algumas metodologias para a classificação de contingências críticas em sistemas elétricos de potência, identificando quais métodos possuem semelhanças e quais abordagens apresentam resultados discrepantes. Para atingir o objetivo, foram implantadas no software MATLAB algumas das metodologias mais conhecidas para classificar as contingências automaticamente. Testes são realizados considerando os sistemas do IEEE de 14 e 57 Barras.

Palavras-chave— Estabilidade de Sistemas de Potência, Classificação de Contingências, Sistemas Elétricos de Potência, Índices de Desempenho, Curva PV, Método da Continuação.

1 Introdução

Restrições econômicas e ambientais têm levado os Sistemas Elétricos de Potência (SEP) a operarem cada vez mais próximos aos seus limites operativos. O crescente aumento da demanda e a ocorrência de contingências ou perturbações podem afetar o fornecimento de energia aos centros consumidores de forma adequada, isto é, respeitando certos padrões de qualidade. Neste sentido, é fundamental que o planejamento e a operação do SEP levem em consideração as possíveis falhas que podem ocorrer no sistema, visando mantê-lo operando de forma estável. Caso alguma contingência ocorra, os operadores do sistema já estarão preparados para tomarem ações de controle que garantam o fornecimento de energia com qualidade e de maneira ininterrupta.

Um dos principais estudos realizados em SEP é a Análise de Contingência. O objetivo deste estudo é avaliar o comportamento dos parâmetros do sistema quando uma perturbação ocorre. Esta perturbação pode alterar os fluxos de potência nas linhas de transmissão e tensões nos barramentos dependendo, dentro outros fatores, do local de ocorrência e da intensidade. De modo geral as contingências são divididas em duas categorias: as programadas, que ocorrem devido ao desligamento de unidades geradoras ou linhas de transmissão para manutenções; e as não programadas, resultantes da ocorrência de distúrbios, como curtos-circuitos ou falhas de equipamentos como transformadores, disjuntores, relés ou geradores.

Após a saídas de equipamentos, os SEP devem continuar operando dentro de limites de operação adequados. A fim de avaliar se a operação está sendo

realizada de maneira adequada e determinar quais ações devem ser tomadas quando da ocorrência de contingências, são realizados estudos de maneira *off-line* das possíveis contingências que podem ocorrer, classificando-as de acordo com seu grau de severidade. As contingências simples, onde apenas um elemento sai de operação, são conhecidas como critério N-1. As contingências múltiplas são aquelas em que mais de um elemento sai de operação.

De acordo com Burada *et al* (2016), são utilizados três fatores na análise de contingência:

- **Criação:** É criada uma lista das possíveis contingências;
- **Seleção:** Tem como objetivo selecionar as contingências mais críticas;
- **Avaliação:** Consiste em realizar as medidas de controle a serem tomadas caso ocorra as contingências mais críticas.

Na literatura, existem várias metodologias para classificação de contingências críticas. Ejebe e Wollenberg (1979), determinaram as contingências mais críticas através do método dos índices de desempenho de tensão e de potência ativa. Este método consiste em avaliar o comportamento da mudança do fluxo de potência das linhas transmissão e das tensões nos barramentos quando da ocorrem perturbações.

De acordo com Wood e Wollenberg (1996), a seleção de contingências críticas pode ser realizada a partir dos fatores de sensibilidade linear. Zambroni de Souza *et al* (2003) aplicou a norma do vetor tangente como parâmetro para análise de contingências. Por sua vez, Rios *et al* (2009) utilizou a análise modal da matriz Jacobiana e fatores de participação para criar um *ranking* de severidade, indicando as contingências mais críticas para o sistema. Zambroni de Souza *et al* (2011), através das curvas QV, determinou a reserva de potência reativa dos barramentos do sistema e então classificou as contingências como críticas aquelas que produziram as menores margens de potência reativa.

É evidente a variedade de metodologias disponíveis na literatura para classificação de contingências críticas em SEP. Alguns métodos são mais aplicáveis para a análise de estabilidade de tensão, já outros com relação a mudança das tensões dos barramentos e dos fluxos de potências nas linhas de transmissão, verificando se os limites de operação foram ultrapassados. Este artigo tem como objetivo apresentar uma análise comparativa de algumas destas metodologias para classificação de contingências em SEP. Será avaliado o critério N-1 aplicado à saída de linhas de transmissão. Como resultado, espera-se encontrar discrepâncias e similaridades na classificação de contingências utilizando diferentes abordagens. Para obter os resultados, cada uma das metodologias será implementada no *software* Matlab.

O presente artigo está dividido da seguinte forma: na Seção 2 são apresentados os métodos para

classificação das contingências críticas e a metodologia utilizada. Na Seção 3 são apresentados os resultados obtidos. A seção 4 apresenta a discussão dos resultados. Na Seção 5, são apresentadas as conclusões obtidas a partir da realização deste artigo.

2 Metodologia para Classificação de Contingências Críticas

Para realizar a classificação de contingências críticas em SEP, foram comparadas metodologias disponíveis na literatura, seguindo os seguintes passos:

- Considerou-se um caso base. A solução do fluxo de potência foi obtida utilizando um pacote de arquivos do MATLAB, chamado MATPOWER. (ZIMMERMAN *et al*, 2011);
- Implementou-se no MATLAB algumas metodologias usualmente utilizadas para classificação de contingências críticas em SEP;
- Simulou-se as contingências somente em linhas de transmissão dos sistemas de 14 e 57 barras do IEEE;
- Foi utilizado o critério de 15% do número total de linhas para realizar o *ranking* das contingências mais críticas.
- Comparou-se as metodologias implementadas, identificando quais delas possuíam respostas em comum e se alguma produziu respostas discrepantes.

Foram escolhidas as seguintes abordagens para classificação de contingências: índices de desempenho de performance, fator de sensibilidade, margem de carga através da curva PV e margem de carga de potência reativa a partir da curva QV. Uma breve descrição de cada uma delas é feita a seguir. Maiores detalhes podem ser encontrados nas referências.

2.1 Índice de desempenho de performance

A abordagem proposta por Ejebe e Wollenberg (1979), compara os valores de pré-contingência dos fluxos de potências e tensões nos barramentos, com o de pós-contingência. O índice de desempenho de performance de tensão (*PIV*) é calculado a partir da Equação (1).

$$PIV = \sum_{i=1}^n \left(\frac{W}{2z} \right) \left[\frac{|V_i| - |V_i^{lim}|}{\Delta V_i^{lim}} \right]^{2z} \quad (1)$$

onde:

$|V_i|$: Magnitude da tensão na barra i^{th}

$|V_i^{lim}|$: Tensão especificada da barra i^{th}

ΔV_i^{lim} : Desvio de tensão limite permitido na i^{th} barra

z : Expoente da função de penalidade
 n : Número de barras do sistema
 W : Fator de ponderação não negativo

O índice de desempenho de performance de potência ativa ($PIMW$) é calculado usando (2).

$$PIMW = \sum_{i=1}^{N_l} \left(\frac{W}{2z} \right) \left[\frac{P_l}{P_l^{\lim}} \right]^{2z} \quad (2)$$

onde N_l representa o número de linhas do sistema;

P_l : Fluxo de potência ativa na linha l e P_l^{\lim} : Fluxo máximo de potência ativa na linha l

O P_l^{\lim} é calculado a partir da Equação (3).

$$P_l^{\lim} = \frac{V_i V_j}{X_{ij}} \quad (3)$$

onde: V_i : representa a magnitude de tensão na barra i , V_j a magnitude de tensão na barra j , X_{ij} : Reatância entre as barras i e j

Ejebu e Wollenberg (1979), classificaram as contingências críticas a partir dos maiores valores de cada índice de desempenho. Agreira *et al* (2006), classificou contingências críticas a partir dos maiores valores da soma dos índices de desempenho de performance de tensão e de potência normalizados, mostrada na Equação (4):

$$PI = PIV + PIMW \quad (4)$$

2.2 Fator de Sensibilidade

Proposto por Wood e Wollenberg (1996), os fatores de sensibilidade calculam a mudança nos fluxos de potência e de geração devido a ocorrência de contingências. Neste artigo somente será avaliada a saída de linhas de transmissão. Portanto, somente a mudança nos fluxos de potência será considerada. A Equação (5) mostra a expressão usada para o cálculo da mudança do fluxo de potência.

$$d_{lk} = \frac{\Delta f_l}{f_k^0} \quad (5)$$

onde:

d_{lk} : Fator de distribuição da interrupção da linha l após a interrupção na linha k

Δf_l : Mudança do fluxo de potência ativa na linha l

f_k^0 : Fluxo de potência ativa na linha k antes da contingência

A classificação das contingências críticas é realizada através da Equação (6), ordenando as mesmas a partir dos maiores valores para os menores.

$$d_T = \sum_{l=i}^N d_{lk} \quad (6)$$

2.3 Margem de Carga de Potência Ativa

De acordo com Chen e Bromberg (2006), a curva PV é uma das metodologias para realizar o estudo de estabilidade de tensão. A partir do traçado desta, é possível determinar o ponto de máximo carregamento do sistema e também o quanto perto o sistema está operando do ponto de colapso.

Uma curva PV padrão é mostrada na Figura 1. As principais informações da curva são destacadas.

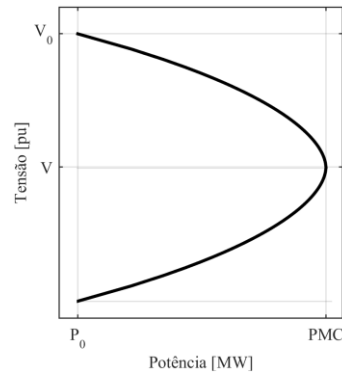


Figura 1. Curva PV padrão

Na Figura 1, PMC representa o ponto de máximo carregamento. Nesse ponto, o sistema é incapaz de fornecer potência adicional sem que o mesmo entre em colapso. A tensão nesse ponto equivale a tensão crítica (V_c). Outra importante informação que pode ser obtida através da curva PV é a margem de carga (MC). A MC é dada pela diferença entre o PMC e a potência inicial de operação do sistema P_0 .

Quando ocorre uma contingência em um SEP, o comportamento da curva PV é alterado. A Figura 2 mostra o comportamento da curva PV antes e depois da ocorrência de uma contingência. Note que a margem de carga pré-contingência é maior que a pós-contingência, ou seja, a MC tende a diminuir quando da ocorrência de contingências.

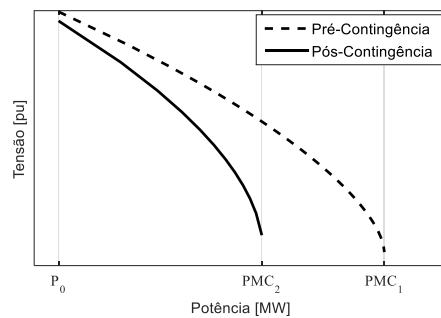


Figura 2. Curva PV antes e após uma contingência

A classificação das contingências críticas nesta metodologia é realizada pelas maiores diferenças

entre as margens de carga do caso de pré-contingência com a de pós-contingência.

A curva PV será traçada neste trabalho utilizando o fluxo continuado, através do vetor tangente proposto por Zambroni de Souza *et al.* (1997) e mostrado na subseção 2.3.1. Esta metodologia possui menor esforço computacional, uma vez que o incremento de potência ocorre de maneira controlada.

2.3.1 Fluxo Continuado

A ferramenta do fluxo continuado, permite encontrar o PMC e traçar a curva PV com redução do esforço computacional. Matematicamente o método segue o seguinte modelo:

$$f(x, \lambda) = 0 \quad (7)$$

Em (7), o parâmetro x corresponde as variáveis de estado do fluxo de potência; λ é o parâmetro que leva o sistema de um ponto de equilíbrio para outro.

O método do vetor tangente é dividido em duas etapas: a primeira chamada de previsor, onde é calculada a direção do vetor tangente para aumento de carga e/ou geração. Porém, o ponto previsto não necessariamente representa um ponto de equilíbrio do sistema. A segunda etapa representa o passo corretor. Este leva o ponto de operação previsto no passo prever para um ponto de equilíbrio do sistema. A Figura 3 ilustra os dois passos do método.

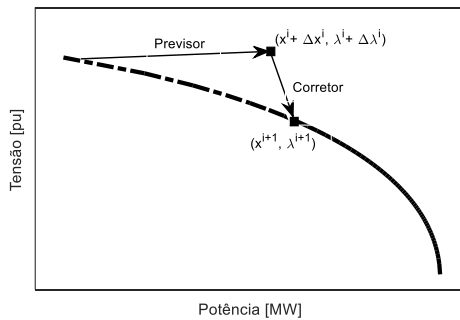


Figura 3. Etapas do Método da Continuação

Para calcular o vetor tangente na etapa previsor é utilizado a Equação (8).

$$VT = \begin{bmatrix} \frac{\Delta \theta}{\Delta \lambda} \\ \frac{\Delta V}{\Delta \lambda} \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} P_0 \\ Q_0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

onde Vetor Tangente (VT), Matriz Jacobiana (J) Vetor de Potência Ativa e Reativa

O passo previsor é calculado através da Equação (9), onde $\| \cdot \|$ indica a norma euclidiana.

$$\Delta \lambda = \frac{1}{\|VT\|} \quad (9)$$

O passo corretor é realizado a partir da solução do fluxo de potência para os novos valores de potência ativa e reativa do sistema.

Para obter a Margem de Carga (MC) a partir da curva PV, foram utilizadas as tensões e a geração das unidades geradoras e considerado um incremento de carga e geração com fator de potência constante, representado através das Equações (10), (11) e (12).

$$P_g = P_{g0}(1 + \Delta \lambda) \quad (10)$$

$$P_l = P_{l0}(1 + \Delta \lambda) \quad (11)$$

$$Q_l = Q_{l0}(1 + \Delta \lambda) \quad (12)$$

onde P_{g0} representam as gerações de potência ativa, P_{l0} e Q_{l0} cargas ativas e reativas no caso base, respectivamente"

2.4 Margem de Carga de Potência Reativa

De acordo com Zambroni de Souza *et al* (2011), a classificação de contingências críticas pode ser realizada a partir das menores margens de carga reativa quanto da ocorrência de contingências. Portanto, o primeiro passo é traçar a curva QV de cada barra do sistema e depois escolher a menor margem a cada contingência. A Figura 4, mostra o traçado padrão da curva QV com suas principais características.

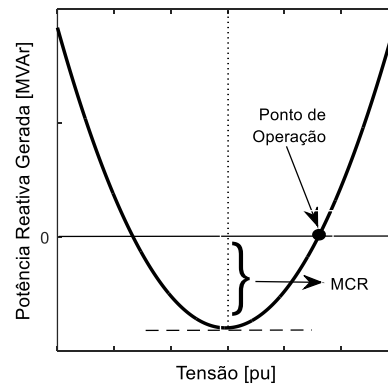


Figura 4. Curva QV padrão

A margem de carga reativa (MCR) indica se a barra está em déficit ou quanto ela pode fornecer de potência reativa (KUNDUR, 1994).

3 Resultados

Nas subseções 3.1 e 3.2 são mostrados os resultados obtidos a partir da utilização das metodologias para classificação de contingências críticas. Para realizar as simulações, foram considerados os sistemas de 14 e 57 barras do IEEE. Os diagramas referentes aos sistemas podem ser encontrados em (University of Washington, 2018).

Tabela 1. Contingências Críticas pelos Métodos de PIV, PIMW e PI do Sistema IEEE 14 Barras

| Índice de Desempenho de Tensão | | | Índice de Desempenho de Potência Ativa | | | Soma dos Índices de Tensão e Potência Ativa | | |
|--------------------------------|-------------|-----------|--|-------------|-----------|---|-------------|-----------|
| Barra Inicial | Barra Final | PIV | Barra Inicial | Barra Final | PIMW | Barra Inicial | Barra Final | PI |
| 5 | 6 | 1,5670 | 1 | 5 | 0,8903 | 5 | 6 | 1,9934 |
| 3 | 4 | 1,5293 | 3 | 4 | 0,8849 | 3 | 4 | 1,9699 |
| 12 | 13 | 1,5190 | 5 | 6 | 0,8844 | 1 | 5 | 1,9466 |
| 7 | 8 | Ilhamento | 7 | 8 | Ilhamento | 7 | 8 | Ilhamento |

Tabela 2. Contingências Críticas pelos Métodos d_r , ΔMC e MCR do Sistema IEEE 14 Barras

| Sensibilidade | | | Margem de Carga Ativa | | | Margem de Carga Reativa | | |
|---------------|-------------|-----------|-----------------------|-------------|-------------|-------------------------|-------------|-----------|
| Barra Inicial | Barra Final | d_r | Barra Inicial | Barra Final | ΔMC | Barra Inicial | Barra Final | MCR |
| 9 | 14 | 3,0188 | 1 | 2 | 706,2 | 5 | 6 | 26,9332 |
| 1 | 5 | 2,7914 | 2 | 3 | 468,5 | 2 | 3 | 49,3869 |
| 6 | 11 | 2,4863 | 5 | 6 | 443,3 | 4 | 7 | 51,2873 |
| 7 | 8 | Ilhamento | 7 | 8 | Ilhamento | 7 | 8 | Ilhamento |

Tabela 3. Contingências Críticas pelos Métodos de PIV, PIMW e PI do Sistema IEEE 57 Barras

| Índice de Desempenho de Tensão | | | Índice de Desempenho de Potência Ativa | | | Soma dos Índices de Tensão e Potência Ativa | | |
|--------------------------------|-------------|------------|--|-------------|------------|---|-------------|------------|
| Barra Inicial | Barra Final | PIV | Barra Inicial | Barra Final | PIMW | Barra Inicial | Barra Final | PI |
| 35 | 36 | Divergente | 35 | 36 | Divergente | 35 | 36 | Divergente |
| 49 | 50 | 3,0820 | 1 | 17 | 1,2538 | 1 | 17 | 1,9481 |
| 40 | 56 | 3,0576 | 34 | 35 | 1,2182 | 12 | 17 | 1,8791 |
| 3 | 15 | 3,0440 | 34 | 32 | 1,2182 | 41 | 43 | 1,8609 |
| 6 | 7 | 3,0421 | 11 | 43 | 1,2021 | 6 | 8 | 1,8534 |
| 9 | 10 | 3,0294 | 9 | 55 | 1,1749 | 11 | 43 | 1,8487 |
| 9 | 12 | 3,0141 | 41 | 43 | 1,1737 | 3 | 15 | 1,8426 |
| 4 | 6 | 3,0101 | 28 | 29 | 1,1525 | 6 | 7 | 1,8250 |
| 6 | 8 | 3,0098 | 10 | 51 | 1,1486 | 13 | 15 | 1,8239 |
| 21 | 20 | 3,0076 | 12 | 17 | 1,1385 | 31 | 32 | 1,8182 |
| 4 | 5 | 3,0075 | 7 | 8 | 1,1346 | 57 | 56 | 1,8113 |
| 57 | 56 | 3,0072 | 27 | 28 | 1,1240 | 56 | 41 | 1,8112 |
| 32 | 33 | Ilhamento | 32 | 33 | Ilhamento | 32 | 33 | Ilhamento |

Tabela 4. Contingências Críticas pelos Métodos d_T , ΔMC e MCR do Sistema IEEE 57 Barras

| Sensibilidade | | | Margem de Carga Ativa | | | Margem de Carga Reativa | | |
|---------------|-------------|------------|-----------------------|-------------|-------------|-------------------------|-------------|------------|
| Barra Inicial | Barra Final | d_T | Barra Inicial | Barra Final | ΔMC | Barra Inicial | Barra Final | MCR |
| 35 | 36 | Divergente | 35 | 36 | Divergente | 35 | 36 | Divergente |
| 48 | 49 | 16,5206 | 25 | 30 | 1090,9 | 34 | 35 | 0,08512 |
| 34 | 32 | 8,5361 | 34 | 32 | 1030,8 | 34 | 32 | 0,09193 |
| 34 | 35 | 6,5347 | 34 | 35 | 1029,4 | 25 | 30 | 0,5455 |
| 9 | 55 | 6,1125 | 7 | 29 | 933,35 | 37 | 38 | 3,6442 |
| 25 | 30 | 5,8821 | 37 | 38 | 885,81 | 30 | 31 | 5,3398 |
| 31 | 32 | 5,7511 | 36 | 37 | 743,78 | 36 | 37 | 7,2183 |
| 30 | 31 | 5,7099 | 30 | 31 | 634,97 | 21 | 22 | 9,6908 |
| 22 | 23 | 5,3621 | 28 | 29 | 574,56 | 31 | 32 | 9,7340 |
| 23 | 24 | 5,3459 | 9 | 55 | 567,74 | 37 | 39 | 10,0522 |
| 3 | 4 | 5,2558 | 29 | 52 | 523,86 | 9 | 55 | 12,2398 |
| 21 | 20 | 5,0890 | 27 | 28 | 431,34 | 7 | 29 | 12,3793 |
| 32 | 33 | Ilhamento | 32 | 33 | Ilhamento | 32 | 33 | Ilhamento |

3.1 Sistema de 14 barras

Na Tabelas 1 são mostradas as classificações das 3 contingências mais críticas a partir método de índices de desempenho de tensão (PIV), de potência ativa (PIMW) e Soma dos índices (PI).

A Tabela 2 mostra o *ranking* das 3 contingências mais críticas, através do método do fator de sensibilidade (d_T), margem de carga ativa (ΔMC) e margem de carga reativa (MCR).

3.2 Sistema de 57 barras

Na Tabela 3 são mostradas as classificações das 12 contingências mais críticas a partir método de índices de desempenho de tensão, de potência ativa e soma dos índices. A Tabela 4 mostra o *ranking* das 12 contingências mais críticas, através do método do fator de sensibilidade, margem de carga ativa e margem de carga reativa.

4 Discussão

4.1 Sistema de 14 barras

A partir do resultado obtido usando o PIV (Tabela 1), a contingência mais crítica ocorreu na linha que interliga as Barras 5 e 6. Cabe destacar que esta linha possui um LTC para realizar o controle de tensão na Barra 5. A segunda contingência mais foi aquela que interliga as Barras 3 e 4. Neste caso, a Barra 3 tem como característica possuir a maior carga do sistema. A terceira contingência mais crítica foi na linha que interliga as Barras 12 e 13, as duas Barras possuem cargas conectadas a elas. Portanto, como o este índice leva em consideração a variação da tensão quando da ocorrência de contingências, dois fatores têm grande influência nesta classificação: o mon-

tante de carga conectada as barras adjacentes ao evento e a perda de dispositivos de controle de tensão resultantes da contingência.

Em relação ao PIMW (quarta a sexta colunas da Tabela 1), as contingências mais críticas (linhas 1-5 e 3-4, por exemplo) ocorreram nas linhas próximas das barras com unidades geradoras, onde a potência injetada tende a ser maior. Note que, enquanto o primeiro método considera a linha 5-6 como mais crítica, este segundo método classifica a saída da linha 1-2 como mais crítica. No entanto, a linha 5-6 é classificada como a terceira mais crítica no segundo método, explicitando sua severidade.

Comparando o PI com o PIV e o PIMW, mostrados nas linhas 7 a 9 da Tabela 1, nota-se que as contingências mais críticas observadas dois métodos anteriores também estão na classificação, destacando a contingência na linha que interliga as Barras 5 e 6.

O método d_T mostrado nas três primeiras colunas Tabela 2 leva em consideração a mudança do fluxo de potência ativa nas linhas após ocorrência de uma contingência, tomando como base o caso pré-contingência. Para o sistema IEEE 14 Barras, a contingência mais crítica aquela que considera a saída da linha que interliga as Barras 9 e 14. Neste caso, o fluxo de potência para abastecer a carga ligado a Barra 14 possui apenas um caminho, sobrecarregando a linha que interliga as barras 13 e 14. Outra contingência que se destaca é a saída da linha entre as Barras 1 e 5, que ocupa a segunda posição no *ranking*, onde a Barra 1 é a *slack* do sistema IEEE 14 Barras. A terceira contingência mais crítica foi na linha que interliga as Barras 6 e 11, onde a Barra 6 possui um compensador síncrono conectada a mesma e a Barra 11 possui apenas duas linhas de transmissão para abastecer sua carga.

No que se refere ao resultado da ΔMC (quarta a sexta colunas da Tabela 2) este possui comportamento parecido àquele obtido no PIMW, classificando as

contingências mais críticas as linhas próximas das unidades geradoras e de compensadores síncronos.

A classificação a partir do método MCR (colunas sete a nove da Tabela 2), identificou como eventos mais críticos aqueles nas linhas próximas aos compensadores síncronos, sendo a contingência mais crítica a que ocorre na linha que interliga as Barras 5 e 6.

Com base na classificação obtida através dos métodos supracitados, é possível afirmar que a contingência mais crítica é àquela que ocorre na linha que interliga as Barras 5 e 6. Dentre as seis classificações avaliadas, em três delas essa contingência ficou na primeira posição e em duas foi classificada como a terceira mais crítica.

A Tabela 5 apresenta uma comparação das classificações avaliadas, mostrando quais metodologias possuem mais classificações em comum, não levando em consideração o ilhamento de barra. Por exemplo, na posição referente a linha 2 e coluna 3 da Tabela 5, observa-se que 2 contingências estão classificadas entre as 3 mais críticas tanto no método PIV como no PIMW.

Tabela 5. Comparação entre Classificações no Sistema IEEE 14

| | PIV | PIMW | PI | d_T | ΔMC | MCR |
|-------------|-----|------|----|-------|-------------|-----|
| PIV | X | 2 | 2 | 0 | 1 | 1 |
| PIMW | 2 | X | 3 | 1 | 1 | 1 |
| PI | 2 | 3 | X | 1 | 1 | 1 |
| d_T | 0 | 1 | 1 | X | 0 | 0 |
| ΔMC | 1 | 1 | 1 | 0 | X | 2 |
| MCR | 1 | 1 | 1 | 0 | 2 | X |

PIV: Índice de Desempenho de Tensão ; PIMW: Índice de Desempenho de Potência Ativa; PI: Soma de PIV com PIMW; d_T : Fator de Sensibilidade; ΔMC : Margem de Carga de Potência Ativa; MCR: Margem de Carga de Potência Reativa

Ainda em relação a Tabela 5, as classificações que apresentaram mais resultados em comum ocorreram entre o índice de potência ativa (PIMW), com a soma dos índices de desempenho (PI) (todas as contingências classificadas como críticas são comuns nas duas abordagens). Um dos motivos destas metodologias resultarem em classificações similares reside no fato de que o segundo método utiliza o resultado do primeiro para fazer o *ranking*.

Como os índices PIV e d_T utilizam parâmetros totalmente distintos para realizar as suas respectivas classificações, esses métodos apresentaram o menor número de classificações em comum, nenhuma das 3 contingências (linha 2 coluna 3). A mesma frequência é observada na comparação entre as metodologias baseadas na margem de carga reativa (MCR) e na fator de sensibilidade d_T . Novamente, estas abordagens analisam parâmetros distintos: o primeiro utiliza a injeção de potência reativa nas barras para realizar o *ranking* e o segundo o fluxo de potência ativo nas linhas.

4.2 Sistema de 57 barras

Nos resultados encontrados em todas as metodologias usando o sistema IEEE 57 Barras (Tabelas 3 e 4), quando ocorre uma contingência na linha que interliga as Barras 35 e 36, no ponto de operação considerado, o sistema torna-se divergente.

A segunda contingência mais crítica, obtida pelo método PIV, é aquela que ocorre na linha que interliga as Barras 49 e 50 (primeira a terceira colunas da Tabela 3). Cabe destacar que, caso ocorra essa contingência no sistema, apenas uma linha de transmissão irá abastecer a carga ligada a Barra 50. A terceira contingência mais crítica ocorreu na linha que interliga as barras 40 e 56. Essa linha possui um LTC para controlar a tensão e, em caso de contingência, a Barra 40 deixar de possuir conexão com o restante do sistema. As outras contingências mais críticas classificadas ocorreram próximos a unidades geradoras e compensadores síncronos.

Para o caso da classificação pelo índice PIMW (quarta a sexta colunas da Tabela 3), a segunda contingência mais crítica foi aquela que ocorreu na linha que interliga as Barras 1 e 17 (sendo a Barra 1 a barra *slack*). Na terceira e a quarta contingências mais críticas a Barra 34 está envolvida. Como existe apenas duas linhas ligadas a ela, quando alguma dessas linhas sai de operação, resta apenas um caminho para o fornecimento de potência a carga.

Quando é realizada se analisa o índice PI (colunas sete a nove) o método classificou como contingências mais críticas aquelas que ocorreram nas linhas próximas a unidades geradoras ou compensadores síncronos, como também linhas com LTCs. Assim, observa-se que os dispositivos de controle de tensão tiveram grande influência nos resultados obtidos pelo índice PI.

No que tange a classificação pelo fator de sensibilidade (d_T) (colunas 1 a 3 da Tabela 4), com exceção do caso divergente, o método classificou como a contingência mais crítica a linha que interliga as Barras 48 e 49. Entretanto, em comparação com as demais abordagens mostradas nas Tabelas 3 e 4, essa linha apareceu entre as 12 mais críticas apenas nessa metodologia. As demais contingências críticas apresentadas no fator de sensibilidade apresentaram similaridade com os resultados obtidos com o índice PIMW, ou seja, com forte influência da Barra 34.

No método ΔMC (colunas 4 a 6 da Tabela 4), é importante destacar a terceira e a quarta posição da classificação, onde a Barra 34 novamente está envolvida como nas metodologias do índice de desempenho e do fator de sensibilidade. As outras contingências críticas não seguiram um padrão na classificação na comparação entre elas,

A classificação obtida na via MCR (colunas 7 a 9 Tabela 4), mostra um *ranking* muito parecido com aquele da ΔMC . A segunda e terceira contingência mais crítica a Barra 34 está envolvida na contingência que assume a terceira posição no *ranking*.

Da mesma maneira abordada para o sistema o IEEE 14, a Tabela 6 compara os métodos em relação a classificações em comum para o sistema IEEE 57.

Tabela 6. Comparação entre Classificações no Sistema IEEE 57

| | PIV | PIMW | PI | d _T | ΔMC | MCR |
|----------------|-----|------|----|----------------|-----|-----|
| PIV | X | 1 | 4 | 1 | 1 | 1 |
| PIMW | 1 | X | 5 | 4 | 6 | 4 |
| PI | 4 | 5 | X | 2 | 1 | 1 |
| d _T | 1 | 4 | 2 | X | 6 | 7 |
| ΔMC | 1 | 6 | 1 | 6 | X | 9 |
| MCR | 1 | 4 | 1 | 7 | 9 | X |

De acordo com a Tabela 6, os métodos apresentaram poucas classificações em comum. Cabe destacar a similaridade existente entre os índices margem de carga (ΔMC) com o fator de sensibilidade (d_T) e também com a margem de carga reativa (MCR) (7 e 9 classificações, respectivamente, em comum dentre as 12 mais críticas).

5 Conclusão

Este artigo apresentou a comparação de metodologias para realizar um *ranking* de severidade de contingências em linhas de transmissão de sistemas elétricos de potência, visando encontrar similaridades e discrepâncias entre algumas metodologias que se destacam na literatura. Testes foram realizados considerando os sistemas IEEE 14 e 57 Barras.

Em relação ao sistema IEEE 14 Barras, pode-se afirmar que a contingência mais crítica, considerando as metodologias avaliadas, ocorreu na linha que interliga as Barras 5 e 6, tendo em vista que a mesma ficou entre as primeiras no *ranking* em 5 das 6 ~~todas as~~ metodologias avaliadas. Ademais, pode-se observar que os métodos índice de desempenho de potência ativa (PIMW), fator de sensibilidade (d_T) e margem de carga de potência ativa (MCR), classificaram como mais críticas as contingências em linhas próximas a geradores. O índice de desempenho de tensão (PIV) e da margem de carga (ΔMC) foram mais influenciados pela presença/perda de equipamentos de controle de tensão (LTCS ou geradores/compensadores síncronos).

No sistema IEEE 57 Barras, a contingência mais crítica foi a saída da linha entre as Barras 35 e 36, uma vez que o sistema de equações se torna divergente. Cabe destacar as contingências envolvem a Barra 34, já que a estas ficaram nos primeiros lugares na maioria das metodologias.

No que diz respeito a comparação entre as metodologias, os métodos baseados na margem de carga de potência ativa (ΔMC) e reativa (MCR) foram aqueles que apresentaram o maior número de classificações em comum. Isto provém do fato que ambos têm como foco a estabilidade de tensão. Por outro lado, o índice de desempenho de tensão (PIV) foi aquele que apresentou menos classificações em comum com as demais metodologias.

Agradecimentos

Os autores agradem a UTFPR e a Fundação Araucária pelo auxílio financeiro.

Referências Bibliográficas

- Agreira, C.I. Faustino; Ferreira, C.M. Machado; Pinto, J.A. Dias and Barbosa F.P. Marciel (2006). The Performance Indices to Contingencies Screening. Probabilistic Methods Applied to Power Systems, Vol. Pas-9, No. 1, pp. 97 - 109.
- Burada, S.; Joshi, D. and Mistry, K. D (2006). Contingency Analysis on Power System by using Voltage and Active Power Performance Index. IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy System.
- Chen, X. and Bromberg, D (2015). A robust and efficient power series method for tracing PV curves. Charlotte, NC. IEEE North American Power Symposium, pp. 1 - 6.
- Ejebe, G. C. and Wollenberg, B. F (1979). Automatic Contingency Selection. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. Pas-9, No. 1, pp. 97 - 109.
- Kundur, P (1994). Power System Stability and Control. Palo Alto, California: McGraw-Hill.
- Rios, M. A.; Zapata, C. J.; Gómez, O. and Sánchez J. L (2009). Voltage Stability assessment with Ranking of Contingencies using QV sensibility. IEEE Latin American Transactions, Vol. 7, No. 6, pp. 665 - 672.
- University of Washington. Power Systems Test Case Archive. Disponível em: <<https://www2.ee.washington.edu/research/pstca/>> Acesso em: 27 de Junho de 2018.
- Wood, Allen J. and Woollenberg, Bruce F (1996). Power Generation, Operation, and Control. 2. ed.
- Zambroni de Souza, A. C.; Cañizares, C. A and Quintana, V. H. (1997). New Techniques to Speed Up Voltage Collapse Computations Using Tangent Vectors. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No. 3, pp. 1380 - 1387.
- Zambroni de Souza, A. C.; Silva, A. P. A.; Jardim, J. L. A.; Neto, C. A. S.; Torres, G. L.; Ferreira, C. and Ferreira, L. C. A (2003). A new contingency analysis approach for voltage collapse assessment. Electrical Power and Energy System.
- Zambroni de Souza, A. C.; Mohn, F. W.; Borges, I. F. and Ocariz, T. R (2011). Using PV and QV curves with the meaning of static contingency screening and planning. Electric Power Systems Research.
- Zimmerman, R. D; Murillo-Sánchez, C. E and Thomas, R. J (2011). MATPOWER: Steady-State Operations, Planning and Analysis Tools for Power Systems Research and Education. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 26, No. 1, pp. 12 - 19.