

Uma Metodologia para Construção de Bases de Dados de Variações de Tensão de Curta Duração

Caio M. S. Junqueira* Núbia S. D. Brito*
Benemar A. Souza* Rodrigo A. Coelho*

* Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, PB, (e-mail: caio.junqueira@ee.ufcg.edu.br, nubia@dee.ufcg.edu.br, benemar@dee.ufcg.edu.br).

Abstract: A methodology for measuring occurrences of Short Duration Voltage Variations (SDVV), through a database, is presented in this paper. The procedure is initiated with simulations of short circuits, from a predefined combination of parameters that characterize them, such as: fault resistance, fault type, fault location and loading system. With the use of Redundant Discrete Wavelet Transform (RDWT) and Binary Particle Swarm Optimization Method (BSPO), an optimized allocation process for Power Quality Meters is carried out. At the end, a table with the frequencies of occurrence of SDVV in the chosen meters, which was simulated in the IEEE 13-bus test system, is presented.

Resumo: Uma metodologia para a medição de ocorrências de Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD) por meio da criação de uma base de dados é apresentada neste artigo. O procedimento é iniciado com simulações de curto-circuitos, a partir de uma combinação predefinida de parâmetros que os caracterizam, como: resistência de falta, tipo de falta, localização do curto-circuito e o carregamento do sistema. Com a utilização da Transformada Wavelet Discreta Redundante (TWDR) e do Método de Otimização por Enxame de Partículas Binário (BSPO), um processo de instalação otimizada de medidores de Qualidade de Energia Elétrica é realizado. Ao final, uma tabela com as frequências de ocorrência de VTCD nos medidores escolhidos, a qual foi simulada no sistema-teste de 13 barras do IEEE, é apresentada.

Keywords: Short Duration Voltage Variations; Redundant Discrete Wavelet Transform; Binary Particle Swarm Optimization.

Palavras-chaves: Variações de Tensão de Curta Duração; Transformada Wavelet Discreta Redundante; Otimização por enxame de Partículas Binário.

1. INTRODUÇÃO

Os Sistemas Elétricos de Potência (SEP) estão frequentemente sujeitos a ocorrências (eventos ou ações) que podem conduzi-los a operarem fora das suas condições normais. Após a eliminação de uma ocorrência, uma análise mais detalhada constitui uma ação imprescindível para a avaliação do desempenho do SEP. Essa ação corresponde a uma tarefa de diagnóstico (que envolve a execução de tarefas de detecção, classificação e localização da ocorrência), a qual constitui uma etapa fundamental na busca pela Qualidade da Energia Elétrica (QEE). O diagnóstico tem como objetivo investigar as origens das anormalidades e aplicar medidas corretivas e preventivas.

Este artigo foca nas ocorrências denominadas de Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD), em particular, as causadas por curtos-circuitos (também denominados de faltas), no âmbito dos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE). O estudo das ocorrências representa uma linha de pesquisa importante do estado da arte e uma das etapas mais cruciais é a construção de modelos visando

a geração de sinais simulados, haja vista a dificuldade na obtenção de registros reais (Santos, 2016). Este artigo insere-se nesse contexto e tem como objetivo apresentar uma metodologia para construção de bases de dados de VTCD simuladas, causadas por curtos-circuitos. Para isso, sinais de tensão provenientes de medidores instalados em posições estratégicas no SEP foram utilizados.

O artigo foi organizado em sete seções, incluindo esta seção introdutória. Nas seções 2 e 3 são apresentadas as características das VTCD e da ferramenta matemática utilizada para realizar as etapas de detecção e classificação; na seção 4, o problema de instalação otimizada dos medidores de qualidade é apresentado; na seção 5, a metodologia do artigo é formulada; na seção 6, os resultados são apresentados; por fim, na seção 7, são apresentadas as conclusões inferidas.

2. VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO (VTCD)

O Sistema de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE) constitui uma subdivisão do SEP, cujas interconexões

se confundem com a própria topografia das cidades, ramificando-se ao longo de ruas e avenidas, sendo responsável por conectar o sistema de transmissão ou geradoras de pequeno porte ao consumidor final. Na prática, o SDEE está sujeito a várias ocorrências que podem comprometer os indicadores de QEE, dentre as quais destacam-se as apresentadas na Fig. 1 (ANEEL, 2018).

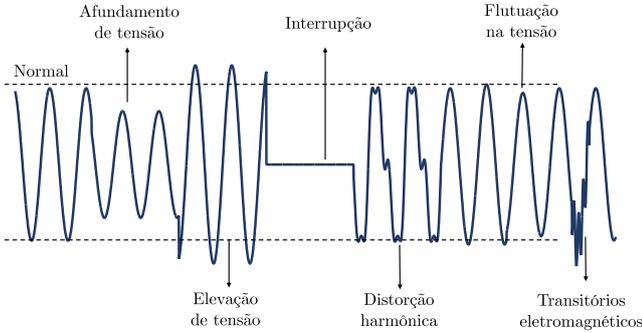


Figura 1. Principais ocorrências dos SDEE.

As VTCD são as ocorrências mais frequentes no SEP e sua ocorrência combinada com a sensibilidade dos equipamentos modernos, têm causado prejuízos financeiros significativos, além de comprometer os índices de satisfação dos consumidores em relação aos serviços oferecidos pelas prestadoras de serviços de distribuição de energia elétrica (Somrak and Tayjasanant, 2019).

As VTCD são definidas, segundo ANEEL (2018), como modificações na amplitude da tensão eficaz nas seguintes faixas: menor que 0,1pu (interrupção); entre 0,1pu e 0,9pu (afundamento de tensão) e maior que 1,1pu (elevação de tensão). Na prática, as VTCD são normalmente, decorrentes de faltas e chaveamentos de cargas pesadas e classificam-se conforme sua duração em:

- Momentâneo: entre um ciclo e três segundos;
- Temporário: entre três segundos e um minuto.

Dependendo das características da falta e do SEP, uma falta pode provocar: i) um afundamento de tensão na fase sob falta; ii) interrupção de tensão nas linhas à jusante da falta; iii) elevação de tensão nas linhas não afetadas. Além disso, devido ao acoplamento eletromagnético existente entre as linhas, a ocorrência de uma falta pode provocar afundamento ou elevação de tensão nas linhas circunvizinhas.

Análise do estado da arte mostrou que devido à presença de transitórios nos seus instantes iniciais (ocorrência da falta) e final (atuação da proteção e eliminação da falta), apenas a amplitude e a duração não conseguem caracterizar completamente uma VTCD (Costa, 2010), conforme apresentado na Fig. 2 para um afundamento de tensão.

Devido às suas características particulares (aleatoriedade do fenômeno, presença de transitórios nos instantes iniciais, redução ou aumento do valor eficaz da tensão e permanência nesse valor por mais de um ciclo e menos de um minuto) e às dos sistemas elétricos (por exemplo, acoplamento eletromagnético existente entre as linhas), o processo de detecção de uma VTCD não é uma tarefa trivial.

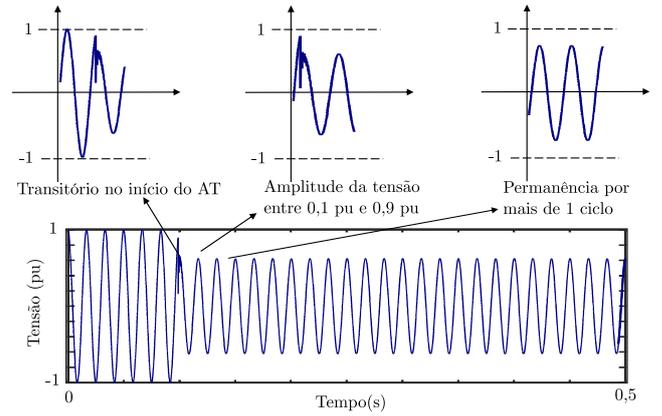


Figura 2. Características de um afundamento de tensão.

Para tratar esse problema, selecionou-se a Transformada Wavelet Discreta Redundante (TWDR), a qual é capaz de identificar a presença de transitórios e as variações de amplitude das ocorrências analisadas, parâmetros importantes para se realizar um diagnóstico de VTCD (Junqueira, 2017).

3. TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA REDUNDANTE (TWDR)

A base matemática da Transformada Wavelet Discreta (TWD) foi introduzida em 1992, por Daubechies (1992), e programada de forma rápida e eficiente usando o conceito de banco de filtros proposto por Mallat (1989). Matematicamente, os filtros são computados, conforme a seguir:

$$c_j(k) = \sum_n g(n - 2k)c_{(j-1)}(n), \quad (1)$$

$$d_j(k) = \sum_n h(n - 2k)c_{(j-1)}(n), \quad (2)$$

sendo: c_j e d_j - os coeficientes de aproximação e de detalhe da escala j , respectivamente; $g(k)$ e $h(k)$ - os filtros passa-baixa e passa-alta, respectivamente (Costa, 2010). Dependendo da *wavelet*-mãe escolhida, a quantidade de coeficientes dos filtros $g(k)$ e $h(k)$ pode ser modificada. Análise do estado da arte mostrou que a *wavelet*-mãe Daubechies 4 (db4) é uma das funções mais utilizadas no processo de detecção e classificação de ocorrências (Priyadarshini and Sushama, 2016), a qual possui quatro coeficientes para cada filtro.

A TWD representa um processo de filtragem digital, seguido de uma subamostragem por um fator de dois ($\uparrow 2$). Como consequência, o número de amostras dos coeficientes de aproximação e detalhe é igual à metade do sinal original. Para superar essa limitação, Percival and Walden (2000) formularam a variante denominada TWD redundante (TWDR), a qual não aplica o processo de subamostragem, sendo portanto, uma transformada invariante no tempo e que pode ser aplicada a qualquer número de amostras, diferente da TWD que requer quantidade de amostras ser uma potência de dois (Costa, 2010).

Conforme se observou, os coeficientes de detalhe vêm sendo usados extensivamente na detecção de transitórios (sinais de alta frequência), os quais entretanto, podem ser

confundidos com os ruídos normalmente presentes no SEP. Visando minimizar a influência do ruído, alguns autores têm utilizado o conceito de energia dos coeficientes de detalhe (Costa (2010); Santos (2016)). Matematicamente, as energias dos coeficientes de detalhe e de aproximação são definidas, respectivamente, como:

$$\xi_d = \sum_{k=1}^{k + \frac{\Delta k_{ciclo}}{2j}} |d_j^2(k)|^2, \quad (3)$$

$$\xi_c = \sum_{k=1}^{k + \frac{\Delta k_{ciclo}}{2j}} |c_j^2(k)|^2, \quad (4)$$

sendo: ξ_d , a energia dos coeficientes de detalhe; ξ_c , a energia dos coeficientes de aproximação.

Neste artigo, a TWDR foi utilizada para detectar e classificar VTCD para os cenários de curto-circuito simulados. Para isso, inicialmente, a TWDR extrai as informações dos coeficientes de aproximação e de detalhe (c_1 e d_1 , respectivamente) para as três fases dos sinais de tensão. A energia dos coeficientes de detalhe (ξ_{dv_a} , ξ_{dv_b} e ξ_{dv_c}) foi calculada e utilizada para identificar os transitórios iniciais e finais do curto-circuito e conseqüentemente, a duração do distúrbio. Enquanto isso, a energia dos coeficientes de aproximação (ξ_{cv_a} , ξ_{cv_b} e ξ_{cv_c}) foi utilizada para classificar as VTCD em relação à intensidade.

4. INSTALAÇÃO OTIMIZADA DE MEDIDORES DE QEE

Os medidores de QEE são equipamentos que capturam os sinais de tensão e corrente provenientes dos transformadores de potencial (TP) e de corrente (TC), respectivamente, os quais adequam os níveis dos sinais para os aparelhos de medição. Em seguida, o sinal analógico é convertido em um sinal digital (conversão A/D) por meio do uso de cartões de aquisição de dados, utilizando uma taxa de amostragem e resolução adequadas para cada aplicação (Junqueira et al., 2015). Logo após, o sinal digital é processado em computadores ou DSP (*Digital Signal Processor*) para detectar, classificar e localizar as ocorrências referentes à QEE. Os resultados dessa última etapa, denominada de Etapa de Diagnóstico, são enviados via internet para o centro de operação do SEP, para caso necessário, ações sejam tomadas.

Segundo Dugan et al. (2004), o custo relacionado a cada medidor de QEE instalado no SEP é calculado da seguinte forma:

$$C(m) = C_{TI} + C_{CAD} + C_{DSP} + C_{Sis.Com.} + C_{Software}, \quad (5)$$

sendo: m - o número do medidor; C_{TI} , o custo do TP e TC; C_{CAD} - o custo dos cartões de aquisição de dados; C_{DSP} , o custo do processador de sinais digitais; $C_{Sis.Com.}$, o custo do sistema de comunicação com a central e $C_{Software}$, o custo com o *software* para detecção, classificação, interface gráfica, sistema de operação etc., dividido pela quantidade de medidores (só é necessária a compra de um único *software* para todo o sistema).

Portanto, o uso de técnicas de instalação de medidores de QEE em pontos estratégicos do SEP, constitui uma ação crucial para redução dos custos de um sistema de monitoramento.

4.1 Formulação Matemática do Problema

A formulação matemática para resolver o problema de instalação ótima de medidores de QEE baseou-se em Junqueira (2017), onde discutiram-se as seguintes questões:

- Quantos medidores precisam ser instalados?
- Onde os medidores precisam ser instalados?

A resposta a estas perguntas requer o uso das definições apresentadas a seguir.

Vetor Monitoração - Esse vetor representa a resposta ao problema de instalação ótima de medidores de QEE e indica o número de medidores necessários para monitorar um SDEE, e em quais barras devem ser instalados. O Vetor Monitoração é definido conforme a Eq.(6).

$$V_{Mon.}(i) = \begin{cases} 1, & \text{instalação do medidor na barra } i \\ 0, & \text{ausência de medidor na barra } i. \end{cases} \quad (6)$$

Matriz de Observabilidade (MO) - é uma matriz binária, na qual cada elemento é definido conforme Eq. (7).

$$mo(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{quando um curto-circuito} \\ & \text{do cenário } i \text{ faz com que uma} \\ & \text{VTCD na barra } j \text{ seja detectada} \\ 0, & \text{quando um curto-circuito} \\ & \text{do cenário } i \text{ não causa uma} \\ & \text{VTCD na barra } j. \end{cases} \quad (7)$$

A MO tem como objetivo mapear o desempenho de um SDEE em relação às VTCD. Ela contém informações dos valores de tensão em cada uma das barras, para cada cenário de curto-circuito. Cada linha dessa matriz representa um cenário de curto-circuito e cada coluna, as tensões remanescentes nas barras. Na sua construção, adotaram-se limiares, abaixo ou acima do qual, uma VTCD deve ser detectada.

Apresenta-se na Fig. 3, a Matriz de Observabilidade para um exemplo hipotético de quatro barras para monitorar afundamentos de tensão, considerando um limiar fixo de 0,9pu.

	Tensão remanescente	Matriz de Observabilidade
Cenário 1	0,14 0,14 0,13 0,11	1 1 1 1
Cenário 2	0,91 0,13 0,12 0,11	0 1 1 1
Cenário 3	0,94 0,42 0,33 0,13	0 1 1 1
Cenário 4	0,98 0,91 0,91 0,11	0 0 0 1

Figura 3. Exemplo de Matriz de Observabilidade.

A primeira linha da MO mostra que para o cenário de curto-circuito 1, todas as barras do sistema hipotético apresentaram afundamento de tensão. A primeira coluna mostra que a barra 1 só consegue detectar um afundamento de tensão no cenário 1. Para as outras linhas e colunas da MO, segue-se o mesmo raciocínio.

Função Objetivo e Restrição - Em um problema de instalação ótima de medidores de QEE, o objetivo principal consiste em determinar a posição dos equipamentos de modo que o número de medidores seja mínimo. Neste artigo, a função objetivo (F_{obj}) foi definida conforme Eq. (8).

$$F_{obj} = \min \sum_{i=1}^n c_{inst.}(i) V_{Mon.}(i), \quad (8)$$

sendo: n - o número de barras do sistema; $c_{inst.}(i)$ - o custo da instalação do medidor.

Para que o conjunto de medidores instalado possa monitorar completamente as VTCD, pelo menos um medidor deve ser capaz de detectá-la. Neste sentido, um vetor restrição, denominado V_r , também conhecido como **Vetor-Redundância** foi definido:

$$V_r = MO_{[n_{cc} \times n]} \times V_{Mon.}^t_{[n \times 1]} \geq [1]_{[n_{cc} \times 1]}, \quad (9)$$

sendo: n_{cc} , o número de cenários de curto-circuitos analisados.

Uma forma de obter a solução desse problema é aplicar o método da busca exaustiva para obter todas as situações possíveis de instalação de medidores. Na prática, esse método é inviável, principalmente quando a dimensão do problema aumenta. Portanto, os problemas reais dessa categoria requerem o uso de métodos de otimização numérica, dentre os quais selecionou-se neste artigo, o método de Otimização por Enxame de Partículas Binário (BPSO), cujos fundamentos são apresentados a seguir.

4.2 Otimização por Enxame de Partículas Binário

O método de Otimização por Enxame de Partículas (PSO), proposto por Kennedy and Eberhart (1995), baseia-se no comportamento de um conjunto de pássaros, abelhas ou peixes, onde cada indivíduo é representado por um vetor referente a sua posição atual ($\vec{x}_i(t)$). A movimentação desse indivíduo para a próxima posição ($\vec{x}_i(t+1)$) vai depender da sua velocidade atual ($\vec{v}_i(t)$), definido como sendo a variação de sua posição, da melhor experiência desse indivíduo ($\vec{P}_{ibest}(t)$) e da melhor experiência do grupo de indivíduos ($\vec{G}_{best}(t)$). O processo de movimentação de uma partícula pelo método PSO é apresentado na Fig. 4.

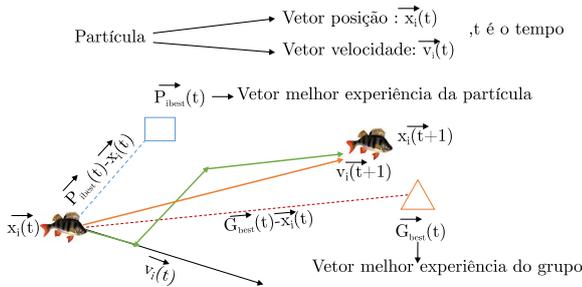


Figura 4. Movimentação da partícula pelo método PSO.

Matematicamente, o método PSO é descrito a partir das equações a seguir.

$$v_i(t+1) = wv_i(t) + c_1r_1(P_{ibest}(t) - x_i(t)) + c_2r_2(G_{best}(t) - x_i(t)), \quad (10)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1), \quad (11)$$

sendo: c_1 e c_2 - os coeficientes de aceleração; w - o termo de inércia; r_1 e r_2 - variáveis aleatórias uniformemente distribuídas no intervalo de 0 a 1.

O método de Otimização por Enxame de Partículas Binário (BPSO), uma versão do método PSO, é utilizado quando o espaço de solução consiste em vetores compostos por 1 (um) ou 0 (zero). Como o problema de otimização neste artigo consiste em instalação (bit 1) ou não-instalação (bit 0) de um medidor em determinada barra do SDEE, o método BPSO ajustou-se perfeitamente.

A diferença principal entre os métodos BPSO e PSO consiste no cálculo da velocidade, que no método BPSO é computada via função sigmóide e a nova posição por meio de probabilidade. A formulação matemática para o método BPSO é apresentada nas equações a seguir.

$$v_{ij}(t+1) = wv_{ij}(t) + c_1r_1(P_{ibest}(t) - x_i(t)) + c_2r_2(G_{best}(t) - x_i(t)), \quad (12)$$

$$v'_{ij}(t+1) = sig(v_{ij}(t+1)) = \frac{1}{1 + e^{-v_{ij}(t)}}, \quad (13)$$

$$x_{ij}(t+1) = \begin{cases} 1, & \text{se } r < \frac{1}{1 + e^{-v_{ij}(t)}} \\ 0, & \text{caso contrário,} \end{cases} \quad (14)$$

sendo: i - o número da partícula; j - a posição no vetor da partícula i ; r - uma variável aleatória uniformemente distribuída no intervalo de 0 a 1.

A função sigmóide é uma função matemática utilizada, cujo nome advém da forma em S do seu gráfico. De acordo com a sua formulação, quanto maior a velocidade de uma partícula, mais próxima do valor 1 (um) da função ela estará, aumentando a probabilidade do valor da Eq. (14) assumir valor 1 (um). De maneira análoga, quanto menor for a velocidade de uma partícula, maiores serão as chances do valor da Eq. (14) assumir valor 0 (zero).

5. METODOLOGIA

A metodologia proposta para a construção de bases de dados de VTCD causadas por curtos-circuitos inicia com a modelagem do sistema-teste, a qual foi feita utilizando o ambiente MATLAB/Simulink. A subestação, as linhas de distribuição e as cargas foram configuradas de acordo com as informações contidas nos documentos do sistema (IEEE, 1992).

Como é inviável a simulação de todas as condições possíveis de curto-circuito, uma prática comum é a utilização de faixas de valores discretizados para cada parâmetro. Assim, para a construção da base de dados, adotaram-se as seguintes variáveis de simulação: resistência de falta, tipo de falta, local de falta e carregamento do sistema. O número de cenários simulados foi definido matematicamente como:

$$N_{cc} = N_{lf} \times N_{tp} \times N_{fr} \times N_{fc}, \quad (15)$$

sendo: N_{cc} , o número de curto-circuito simulados; N_{lf} , a quantidade de locais de falta do alimentador; N_{tp} , a

quantidade de tipos de curto-circuito; N_{fr} , a quantidade de faixas de resistência; N_{fc} , a quantidade de faixas de carregamento.

Em seguida, para cada cenário simulado, um valor de intensidade e duração foi registrado para cada barra do sistema, utilizando a energia dos coeficientes de aproximação e de detalhe da TWDR. Após a detecção e classificação da VTCD, a matriz de observabilidade é construída, de acordo com a Eq. (7). O processo de formulação do problema de otimização requer a construção da matriz MO, no qual ela foi utilizada como restrição no processo de solução (Eq. (9)).

A aplicação do método BPSO ao problema resultou nas seguintes analogias:

- Partículas → barras do sistema;
- População → conjunto de partículas;
- Posição → localização dos medidores de QEE;
- Solução ótima → melhor localização dos medidores;
- Função objetivo → redução de custos;
- P_{ibest} → melhor posição da partícula até a presente iteração;
- G_{best} → melhor posição da população até a presente iteração.

Após a escolha dos locais de instalação dos medidores, optou-se por criar um conjunto de cenários aleatórios com o objetivo de avaliar o desempenho do sistema em relação às VTCD. Para isso, utilizou-se o método de Monte Carlo, que tem como objetivo emular uma situação real, conservando características físicas e lógicas do sistema real em estudo. Para que o método de Monte Carlo seja aplicado ao problema de simulação de curtos-circuitos, é necessário que um sorteio seja realizado a partir da utilização de parâmetros que o caracterizam. Os critérios utilizados para cada parâmetro na simulação de curtos-circuitos são apresentados a seguir.

Trecho de falta - a probabilidade de seleção de um trecho é diretamente proporcional ao seu comprimento.

Localização do curto-circuito - considerou-se uma distribuição uniforme ao longo do trecho. Logo, um valor aleatório próximo de 0 (zero) indica uma localização no início do trecho e um valor aleatório próximo de 1 (um), indica no final do trecho.

Tipo de curto-circuito - os curtos-circuitos em sistemas trifásicos podem envolver mais de uma fase e ter o contato com a terra. Neste artigo, os seguintes tipos de falta foram escolhidos: monofásica (FT), bifásica (FF), bifásica-terra (FFT), trifásica (FFF). Determinou-se a escolha do tipo de falta a partir da probabilidade de ocorrência de cada tipo, baseando-se em dados reais de concessionárias de distribuição de energia elétrica.

Resistência de curto-circuito e Carregamento do sistema - as escolhas da resistência de curto-circuito entre fases, entre fase e terra e o carregamento do sistema foram feitas a partir da utilização de uma probabilidade de ocorrência distribuída uniformemente dentro de um intervalo de valores mínimos e máximos preestabelecidos.

Apresenta-se na Fig. 5, o fluxograma da metodologia completa utilizada.

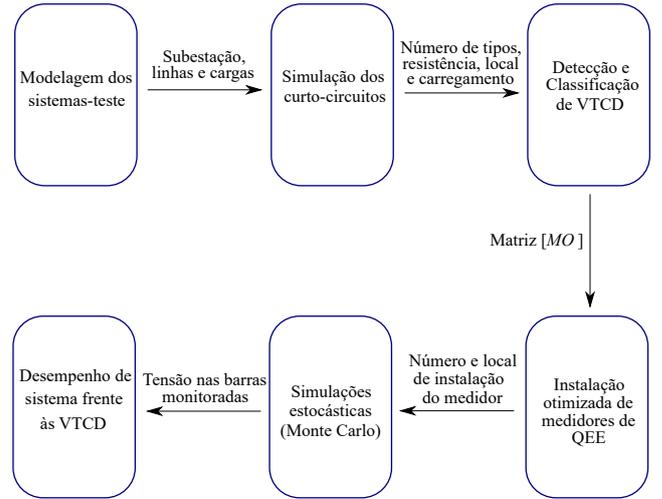


Figura 5. Metodologia .

6. RESULTADOS

A metodologia proposta neste artigo foi aplicada ao sistema-teste do IEEE de 13,8kV e 13 barras, apresentado na Fig. 6. A modelagem do sistema-teste, das condições de curto-circuito e a resolução do problema de otimização foram realizadas no *software* MATLAB.

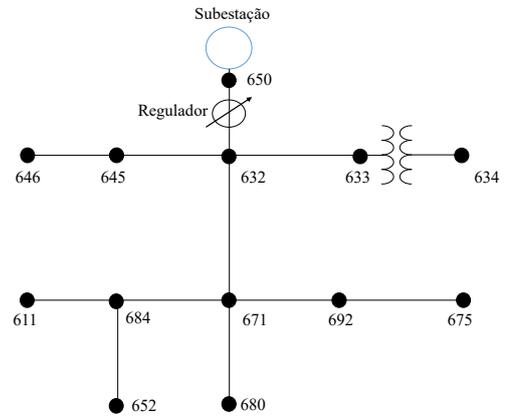


Figura 6. Sistema-teste de 13 barras do IEEE.

O sistema-teste é desequilibrado e composto por: um regulador de tensão na barra 650; um transformador trifásico 13,8 kV/480V na barra 634; trechos trifásicos (650-632, 632-633, 633-634, 632-671, 671-680, 671-692, 692-675), trechos bifásicos (632-645, 645-646 e 671-684) e trechos monofásicos (684-652, 684-611); cargas capacitivas (675, 611); cargas predominantemente resistivas (634, 645, 646, 652, 671, 675, 692, 611).

6.1 Simulação de curto-circuitos

Para a construção dos cenários de curtos-circuitos, utilizaram-se os parâmetros apresentados na Tab. 1.

Para cada trecho do sistema, curtos-circuitos proporcionais à quantidade de fases do trecho foram simulados. No total, foram simulados 96000 curtos-circuitos. Para cada cenário,

Tabela 1. Parâmetros do método de Enumeração de Estados

Parâmetro	Nº de faixas	Passo	Mínimo	Máximo
Resis. fase-terra	15	0,1 Ω	0,1 Ω	1,5 Ω
Resis. entre fases	15	0,1 Ω	0,1 Ω	1,5 Ω
Carregamento	4	5%	90%	105%
Trecho	25	4%	4%	100%
Tipo	4	-	-	-

as tensões remanescentes nas barras foram armazenadas. A informação da detecção ou não detecção de uma VTCD em cada barra do sistema foi fornecida pela TWDR.

As tensões remanescentes de todos os cenários e em todas as barras foram utilizadas na construção da matriz binária MO. As linhas repetidas foram excluídas e o problema reduziu-se a 15 cenários de detecção ou 15 linhas na matriz MO.

6.2 Localização dos Medidores de QEE

Para resolver o problema de instalação ótima de medidores de QEE, os parâmetros apresentados na Tab. 2 foram adotados.

Tabela 2. Parâmetros do BPSO

Termo de inércia (w) = -12
Coefficientes de aceleração c_1 e c_2 = -5
População (número de indivíduos) = 5
Número de iterações = 100

Os valores negativos de w , c_1 e c_2 são justificados por resultarem em velocidades negativas, as quais aumentam a tendência das partículas de se moverem para uma posição com um número elevado de zero (ausência de medidor). O tamanho reduzido da população foi utilizado devido à dimensão do problema, o qual possui um total de 8192 possibilidades (2^{13}). Portanto, para essa quantidade de indivíduos, um valor máximo de 500 posições (5×100 iterações) seriam avaliados.

Após a simulação da rotina de otimização, seguindo todo o procedimento descrito nas seções 4 e 5, obteve-se como solução a instalação dos medidores nas barras 632 e 671. O algoritmo convergiu em menos de 10 iterações e todas as partículas convergiram para a mesma solução, apresentando um grau de confiabilidade da solução.

6.3 Simulações estocásticas (Monte Carlo)

As simulações estocásticas foram feitas a partir dos conceitos apresentados na seção 5. Os parâmetros utilizados são apresentados na Tab. 3.

Tabela 3. Probabilidades de ocorrência pelo método de Monte Carlo

Ocorrência dos tipos	Ocorrência em determinada fase
FT = 0,8005	$3\phi = 0,33$ para cada
FF = 0,1101	$2\phi = 0,5$ para cada
FFT = 0,0766	$1\phi = 1$
FFF = 0,0128	-

Como neste artigo não se levou em consideração a coordenação e atuação da proteção para a extinção do curto-circuito, a duração seguiu uma distribuição equiprovável a

partir de uma extinção natural. De acordo com especialistas na área, para um período entre 0ms e 100ms, a probabilidade de ocorrência é de 80%. Os outros 20% representam a probabilidade de um curto-circuito ser superior a 100ms e inferior a 5 segundos (Cebrian et al., 2010).

Um cenário de um ano foi analisado, a partir da simulação de 490 curto-circuitos, obtidos da média de eventos ocorridos por ano durante um período de sete anos de uma concessionária de energia elétrica (Andrade, 2011). Ao final, construíram-se listas de ocorrências de afundamentos, interrupções e elevações de tensão, apresentados nas Tabs. 4 e 5.

Apresenta-se na Tab. 4, uma concentração de interrupções com duração entre 16,67ms e 200ms, a qual foi monitorada. Como o sistema-teste utilizado possui apenas 13 barras, a intensidade da VTCD observada nos pontos de monitoramento apresenta valores maiores. Logo, um curto-circuito em qualquer parte do sistema provoca reduções significativas, as quais podem ser observadas pela ausência de tensões entre 0,6pu e 0,9pu.

Uma concentração de elevações de tensão na faixa entre 1,2pu e 1,3pu é apresentada na Tab. 5. Isso se deve ao fato de que curtos-circuitos em uma das fases podem provocar elevações de tensão nas linhas não afetadas, como descrito na seção 2. Devido à dimensão do sistema, os efeitos dos curto-circuitos tornaram-se maiores, com registros de elevações de tensão de até 1,4 pu, o que poderia provocar danos nos equipamentos ligados ao sistema.

Para todos os cenários simulados, os medidores foram capazes de detectar ao menos uma VTCD, comprovando que eles de fato, satisfazem ao problema e reduzem o custo do sistema de monitoramento.

7. CONCLUSÃO

Devido à aleatoriedade da ocorrência de Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD) e sabendo que sua principal causa está relacionada aos curto-circuitos nos sistemas elétricos, a construção de uma base de dados simulados representa uma etapa crucial no processo de diagnóstico devido à dificuldade de obtenção de dados reais. Neste sentido, apresentou-se neste artigo uma metodologia para a criação de uma base de dados para avaliar o desempenho do sistema em relação às VTCD.

Um conjunto de simulações de curto-circuito com informações predefinidas foram realizadas, o que possibilitou a obtenção dos dados referentes às tensões remanescentes nas barras para cada cenário simulado. A metodologia fez uso da Matriz de Observabilidade, que apresenta o desempenho do sistema elétrico em relação às VTCD, a qual foi utilizada como restrição do problema de otimização. Como ferramenta para minimizar a quantidade de medidores necessários para o monitoramento, utilizou-se o método de Otimização por Enxame de Partículas Binário (BPSO).

Para o sistema de 13 barras analisado, o processo de otimização convergiu para uma solução com dois monitores localizados nas barras 632 e 671. Os medidores escolhidos foram utilizados para monitorar um conjunto de curto-circuitos aleatórios, obtidos pelo Método de Monte Carlo,

Tabela 4. Ocorrência de afundamentos e interrupção de tensão

Faixa de amplitude (pu)	Faixa de tempo (ms)							
	[0;16,67]	[16,67;50]	[50;100]	[100;200]	[200;300]	[300;500]	[500;1000]	[1000;3000]
(0,8;0,9)	0	0	0	0	0	0	0	0
(0,7;0,8)	0	0	0	0	0	0	0	0
(0,6;0,7)	0	0	0	0	0	0	0	0
(0,5;0,6)	0	1	2	2	0	0	0	0
(0,4;0,5)	4	7	14	5	0	1	2	4
(0,3;0,4)	0	0	1	2	0	0	0	0
(0,2;0,3)	0	0	0	1	0	0	0	0
(0,1;0,2)	5	7	10	3	0	2	1	2
(0,0;0,1)	37	86	151	68	2	6	11	52

Tabela 5. Ocorrência de elevação de tensão

Faixa de amplitude (pu)	Faixa de tempo (ms)							
	[0;16,67]	[16,67;50]	[50;100]	[100;200]	[200;300]	[300;500]	[500;1000]	[1000;3000]
(1,1;1,2)	3	16	13	6	0	0	2	4
(1,2;1,3)	41	81	152	71	1	9	11	50
(1,3;1,4)	2	4	13	5	1	0	1	4

com a utilização de distribuição de probabilidade para cada parâmetro.

Um conjunto de simulações referentes à ocorrência de curto-circuitos durante um ano, obtidas de informações de uma concessionária de energia elétrica, foram realizadas para a construção de uma tabela de ocorrências de VTCD no sistema. A partir dos resultados, observou-se que o sistema influencia diretamente nos valores de tensão remanescente após um curto-circuito. Os afundamentos de tensão concentraram-se na faixa de 0,1pu a 0,6pu, enquanto que as elevações de tensão se concentraram na faixa de 1,1pu a 1,4pu.

Os resultados obtidos demonstraram que a base de dados criada permite avaliar os possíveis desligamentos ou danos a equipamentos conectados às barras de monitoramento escolhidas de maneira estratégica por meio do processo de otimização. Com isso, uma análise dos prejuízos financeiros, assim como, de possíveis locais em que ocorreram os curtos-circuitos podem ser identificados.

REFERÊNCIAS

- Andrade, G.V.J. (2011). Análise estocástica dos afundamentos de tensão em sistemas de distribuição. *Tese de Doutorado*.
- ANEEL (2018). Módulo 8 - qualidade de energia elétrica. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST*.
- Cebrian, J.C., Almeida, C.F.M., and Kagan, N. (2010). Genetic algorithms applied for the optimal allocation of power quality monitors in distribution networks.
- Costa, F.B. (2010). Uma técnica de diagnóstico em tempo real de distúrbios transitórios baseada na transformada wavelet para uso em registradores digitais de perturbação. *Tese de Doutorado*.
- Daubechies, I. (1992). Ten lectures on wavelets. *Philadelphia, USA: CBMS-NSF Regional Conference Series, SIAM*.
- Dugan, R.C., McGranaghan, M.F., Santoso, S., and Beaty, H.W. (2004). Electrical power systems quality.
- IEEE (1992). Ieee 13 node test feeder. *Power System Analysis, Computing and Economics Committee*.
- Junqueira, C.M.S. (2017). Um algoritmo para alocação Ótima de detectores de afundamentos de tensão. *Dissertação de Mestrado*.

- Junqueira, C.M.S., Santos, W.C., Brito, N.S.D., Souza, B.A., Oliveira, A.C., and Trovão, L.G.C. (2015). Desenvolvimento de um protótipo de um relé digital acadêmico. *Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*.
- Kennedy, J. and Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. *Neural Networks, 1995. Proceedings., IEEE International Conference on*, 4, 1942–1948 vol.4.
- Mallat, S.G. (1989). A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 11, 674–693.
- Percival, D.B. and Walden, A.T. (2000). Wavelet methods for time series analysis. *New York, USA: Cambridge University Press*.
- Priyadarshini, M.S. and Sushama, M. (2016). Classification of short-duration voltage variations using wavelet decomposition based entropy criteria. In *2016 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*, 2192–2196.
- Santos, W.C. (2016). Identificação de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição. *Tese de Doutorado*.
- Somrak, T. and Tayjasanant, T. (2019). Minimized financial losses due to interruptions and voltage sags with consideration of investment cost. In *2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia (GTD Asia)*, 29–34.