

Alocação de Monitores de Qualidade da Energia Elétrica para a Observação de VTCDs através da Matriz Híbrida de Cobertura e Algoritmos Genéticos

Douglas Pinto Sampaio Gomes

Mário Oleskovicz

Thais Reggina Kempner

Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação

Escola de Engenharia de São Carlos - USP

São Carlos, Brasil

José de Ribamar Lima Filho

Eletrobrás Distribuição Piauí – EDPI

Gerência de Pesquisa, Desenvolvimento e Eficiência

Energética Teresina, Brasil

Resumo— O aumento de cargas sensíveis em sistemas de distribuição faz a alocação de monitores de qualidade da energia elétrica se tornar um assunto cada vez mais relevante e boas estratégias tornam-se necessárias para alocar tais equipamentos, pois seus custos são elevados e precisam ser minimizados. Nesse sentido, o presente trabalho traz uma metodologia para alocação de monitores que busca minimizar a quantidade de equipamentos a serem instalados para o monitoramento de afundamentos de tensão. A metodologia é baseada no método de obtenção da matriz de tensão remanescente durante a falta, na matriz de cobertura e na aplicação de algoritmos genéticos como ferramenta de otimização. A pesquisa também tem a intenção de trazer como contribuições, modificações na metodologia tradicional para melhor representar estes fenômenos de afundamento de tensão, dando melhor suporte a pesquisas de localização de falta, justificando a formulação de uma matriz híbrida de cobertura. Para testar a metodologia, foi utilizado o sistema teste do IEEE 34-nós.

Palavras-chave— Algoritmos genéticos, Alocação de Monitores, Matriz Híbrida de Cobertura, Qualidade da Energia Elétrica.

I. INTRODUÇÃO

No atual mundo moderno e tecnológico, a disponibilidade, confiabilidade e a Qualidade da Energia Elétrica (QEE) são fatores muito importantes. A principal razão disto está relacionada com o aumento de equipamentos sensíveis e, em muitas situações, causadores de distúrbios presentes na indústria. Consequentemente, diagnosticar e monitorar de forma continuada tais fenômenos se torna um dos principais desafios para pesquisadores e empresas responsáveis por um bom fornecimento da energia elétrica em Sistemas de Distribuição (SD).

Dos distúrbios relacionados a uma má QEE, os Afundamentos de Tensão (AT) são considerados como os mais frequentes, com impactos mais diretos e prejudiciais às cargas, e, desse modo, aos consumidores finais [1]. Tal fato

justifica a necessidade de uma observação contínua desses distúrbios através de técnicas que possibilitem a minimização dos custos associados ao plano de monitoramento, bem como uma maior sensibilidade e observabilidade dos equipamentos quando instalados de forma otimizada.

Nos últimos anos muitos estudos foram conduzidos com intuito de monitorar problemas de QEE em SDs. Para a alocação de monitores baseados no monitoramento de ATs, a Matriz de Cobertura (MC) tem sido utilizada, como em [2] e [3]. No entanto, esta matriz geralmente não é adequada para o uso em SDs radiais. Uma nova proposta de uso é apresentada em [4], chamada de Matriz Topológica de Cobertura (MTC), que considera as inerentes diferenças topológicas entre os sistemas para a alocação dos monitores.

Diferentes metodologias também já discutiram a alocação otimizada de monitores no contexto da QEE. Métodos baseados em programação linear [5], por exemplo, foram apresentados com objetivos focados na redução de custos de monitoramento e a maximização de nós monitorado. A aplicação de algoritmos evolutivos multiobjectivos foi apresentada em [6], via algoritmos genéticos (NSGA-II), como uma estratégia elitista para obter a Fronteira de Pareto do problema formulado.

Como ferramenta no processo de otimização, os algoritmos genéticos vem se destacando por serem heurísticas de métodos evolutivos que conseguem bons resultados em espaços de busca conhecidos, estando presentes em diversas metodologias, como relatados em [4], [8], [9] e [10].

Nesse sentido, o presente trabalho tem como principal objetivo, o monitoramento dos AT causados por todos os possíveis tipos de curtos-circuitos que possam ocorrer em SDs. Para tal, foram utilizadas estratégias no processo de alocação dos monitores a partir da MC, em conjunto com modificações que permitiram redefini-la como uma Matriz Híbrida de Cobertura (MHC) e Algoritmo Genético (AG)

Os autores gostariam de agradecer ao Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica (LSEE), da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC- USP) pela infraestrutura proporcionada, assim como à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e à Eletrobras Distribuição Piauí - EDPI pelo suporte financeiro disponibilizado para a realização deste projeto de pesquisa e desenvolvimento (PD-0042/2014-ANEEL).

como ferramenta de otimização. Para o teste da metodologia proposta, cabe adiantar que o sistema teste do IEEE de 34 nós [11] foi utilizado, e os promissores resultados encontrados foram reportados e comentados na seção 5 deste trabalho.

II. AQUISIÇÃO E PRÉ-PROCESSAMENTO DOS DADOS

Para a otimização do sistema de monitoramento frente aos ATs, deve-se, primeiramente, ter acesso aos dados do SD a ser simulado. Estes devem representar o sistema elétrico desejado de maneira adequada em sua totalidade, incluindo parâmetros tais como: impedância das linhas de distribuição, características dos transformadores, cargas, dados de bancos de capacitores, etc.

A. Modelagem Computacional

Para o desenvolvimento deste trabalho, o *software* ATP (Alternative Transients Program) [12] foi utilizado via a interface gráfica ATPDraw [13]. O ATP é um programa universal para simulação digital de fenômenos transitórios eletromagnéticos, assim como os de natureza eletromecânica. A partir deste, sistemas elétricos complexos e sistemas de controle de estrutura arbitrária podem ser simulados. O ATPDraw é um *software* gráfico, pré-processador para a versão do programa ATP via plataforma MS-Windows.

B. Matriz de Tensão Durante a Falta – MTDF

Após a modelagem e validação do SD, a obtenção da Matriz de Tensão Durante a Falta (MTDF) aparece como passo seguinte. Sua construção é dada a partir da simulação de diferentes situações de curtos-circuitos passíveis de ocorrência sobre o SD. A necessidade desta análise ser baseada na aplicação dos curtos-circuitos se justifica devido ao fato de que estes são a principal causa de ATs em SD [9].

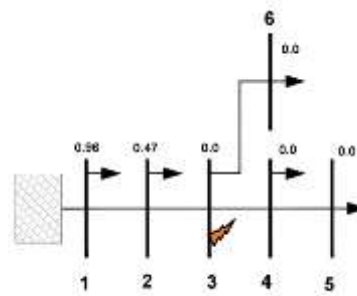
A MTDF é uma matriz que registra todas as amplitudes de tensões residuais pós-falta observadas decorrentes das situações de curtos-circuitos aplicadas sobre o SD em análise. A matriz em sua forma mais pura tem a mesma quantidade de linhas e colunas, referentes ao número de nós do sistema estudado, onde cada elemento $T_{(k,f)}$ representa o módulo da tensão remanescente pós-falta observada no nó k para uma falta aplicada no nó f [14].

As faltas simuladas para a obtenção da MTDF podem ser de diversas naturezas (monofásicas, bifásicas, trifásicas, com ou sem envolvimento com o terra), dependendo somente do caráter do distúrbio a ser analisado.

A MTDF mostra como as faltas se propagam no alimentador estudado de acordo com sua topologia, inferindo sobre sua robustez frente às faltas simuladas e quais pontos deste sistema serão mais ou menos afetados pelo distúrbio analisado. Ou seja, permite um estudo sobre a propagação dos ATs do SD.

A Fig. 1 (a) ilustra um SD exemplo com seis nós, onde um curto-circuito trifásico franco é aplicado ao nó #3. Em seguida, na Fig. 1 (b) uma MTDF resultante para o curto-circuito trifásico franco aplicado em cada um dos nós constituintes do SD exemplo é ilustrada. Observa-se que cada

coluna desta matriz representa a posição de falta aplicada e suas linhas as tensões registradas para cada falta aplicada.



(a)

$$MTDF = \begin{matrix} \text{Nós:} & \#1 & \#2 & \#3 & \#4 & \#5 & \#6 \\ \begin{bmatrix} 0,0 & 0,82 & \mathbf{0,96} & 0,98 & 0,99 & 0,98 \\ 0,0 & 0,0 & \mathbf{0,47} & 0,65 & 0,89 & 0,66 \\ 0,0 & 0,0 & \mathbf{0,0} & 0,35 & 0,67 & 0,34 \\ 0,0 & 0,0 & \mathbf{0,0} & 0,0 & 0,32 & 0,28 \\ 0,0 & 0,0 & \mathbf{0,0} & 0,0 & 0,0 & 0,23 \\ 0,0 & 0,0 & \mathbf{0,0} & 0,29 & 0,61 & 0,0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

(b)

Fig. 1. (a) Sistema de distribuição radial exemplo. (b) MTDF resultante.

C. Matriz de Cobertura (MC) e Matriz Topológica de Cobertura (MTC)

Após a obtenção da MTDF, um limiar de tensão é estabelecido, cuja função está relacionada a qual valor de tensão o monitor de QEE deve passar a registrar as ocorrências de AT. Para isso, deve-se construir uma MC que analisará os valores de tensão do nó estudado para cada posição de falta aplicada.

A MC tem as mesmas dimensões da MTDF, e pode ser obtida pela comparação dos valores das tensões residuais com um limiar de tensão pré-estabelecido (α), de acordo com (1). Assim, cada elemento de entrada da MC é adotado como 1 (um), quando o módulo da tensão de falta remanescente no nó for menor ou igual ao valor do limiar de tensão estipulado em qualquer fase, e com 0 (zero) para outros casos [15].

$$MC_{(j,k)} = \begin{cases} 1, & \text{se } T_{(k,f)} \leq \alpha \text{ p. u. em qualquer fase} \\ 0, & \text{se } T_{(k,f)} > \alpha \text{ p. u. em qualquer fase} \end{cases} \quad (1)$$

Muitas vezes, o valor desse limiar de tensão escolhido, α , é arbitrado como 0,9 p.u., por ser o valor estipulado como o limite para a caracterização de um AT. Um AT é definido por um cenário onde o módulo da tensão eficaz no nó considerado está entre os limites de 0,1 a 0,9 p.u. [16].

$$MC_{0,9} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

A MC apresentada em (2) é construída através dos valores apresentados na Fig. 1 (b), considerando um limiar de 0,9 p.u.

Cabe comentar que, historicamente, a criação desta metodologia foi formulada para sistemas de transmissão malhados [17]. Contudo, quando aplicada em SD radiais, uma particularidade surge. Como fato, tem-se que, resultante de um adequado programa de monitoramento, a alocação de monitores deverá fornecer informação suficiente para a localização da origem do AT, visto que uma baixa tensão remanescente será observada em um nó monitorado próximo a situação de falta experimentada [14]. No entanto, na coluna 3 do exemplo apresentado (Fig. 1 (b)), pode-se observar que a tensão medida nos nós 4, 5 e 6 dá a entender que a situação de curto-circuito foi também aplicada nestes nós, o que não é verdade. Esta situação é resultante através da influência da topologia do SD analisado, fazendo com que surjam zeros (0) fora da diagonal principal da MTDF. Em [4], há uma nova proposição de MC com diferente metodologia, na qual os 0 (zeros) que não representam o afundamento adequadamente são excluídos.

Dito isso, com a intenção de adicionar uma contribuição a proposição citada, o presente trabalho sugere ainda uma nova modificação, cuja função está em não deixar que nós a jusante da falta aplicada possam monitorá-la, criando um suporte maior para a localização das faltas e uma maior diferenciação topológica em SD radiais. Quando uma situação assim se evidencia, uma Restrição topológica é criada. Para melhor exemplificar tal mudança, sua construção é descrita em (3).

$$MTC_{(j,k)} = \begin{cases} 1, \text{ se } T_{(k,f)} \leq \alpha \text{ p. u. em qualquer fase} \\ 0, \text{ se há caso de restrição topológica} \\ 0, \text{ se } T_{(k,f)} > \alpha \text{ p. u. em qualquer fase} \end{cases} \quad (3)$$

Esta nova MC recebe o nome de Matriz Topológica de Cobertura (MTC). A matriz seguinte (4) ilustra a diferença entre a MTC e a MC do sistema exemplo.

$$MTC_{0,9} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

A MTC, assim como a MC, pode ser construída para diferentes limiares. Nos exemplos expostos até então (2 e 4), as mesmas foram construídas quando definido um limiar de 0,9 p.u.. Vale adiantar que nesta pesquisa, será dada uma nova abordagem será adotada ao escolher um limiar para a construção da MTC.

A matriz (5) exemplifica a confecção de uma MTC para o limiar de 0,7 p.u..

$$MTC_{0,7} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

D. Área de Vulnerabilidade e Área Afetada

A fim de indicar a sensibilidade de cada equipamento instalado no nó em análise frente aos curtos-circuitos ocorridos, o conceito de Área de Vulnerabilidade será adotado. Por exemplo, caso um monitor seja instalado no nó #2, considerando a MTC com um limiar de 0,9 p.u. (4), pode-se observar que este será sensibilizado por situações de faltas que ocorrem nos nós #2, #3, #4, #5 e #6.

Sendo assim, caso um monitor seja instalado nos nós #1 e #2, é possível garantir que todos os AT que o sistema possa enfrentar decorrente de faltas trifásicas francas serão observados. Esta garantia que todos os nós do sistema serão observados quando acontecem faltas que originam AT é o principal objetivo relacionado ao problema da alocação otimizada de monitores de QEE.

O monitoramento dos ATs também estará garantido para faltas trifásicas francas quando a alocação for feita nos nós #1 e #3. Porém, na configuração de alocação mencionada anteriormente, as faltas no nó #2 serão observadas por dois monitores, instalados em #1 e #2. Esta repetição de observação caracteriza uma redundância nas medidas que deve ser maximizada, pois quanto maior for seu valor, maior confiabilidade será agregada ao sistema de monitoramento. A confiabilidade então, é aumentada pelo fato relacionado a falha de um monitor, que por algum motivo, não registre a ocorrência do distúrbio, em que outro monitor será sensibilizado e registrará tal situação.

No estudo da Área Afetada, a relação é dada através do mapeamento das áreas de propagação dos afundamentos de tensão [18]. Região que diferente da área de vulnerabilidade (observada através das linhas da MTC), é observada por suas colunas. Por exemplo, para a MTC com um limiar de 0,9 p.u. (4), ao considerar uma falta no nó #3, dois nós seriam sensibilizados por ATs, sendo estes, #2 e #3. Contudo, caso o limiar fosse estabelecido em 0,7 p.u., o nó sensibilizado seria apenas o próprio #3. Consequentemente, considerando limiares menores, a região afetada tende a ser menor porque o AT é mais severo na região mais próxima à falta, diminuindo o número de nós afetados, e dando assim, melhor suporte à localização do curto-circuito, caso este seja o objetivo de análise [6].

III. METODOLOGIA PROPOSTA

No desenvolvimento do trabalho, algumas diferenças na metodologia proposta podem ser claramente observadas em comparação aos trabalhos encontrados na literatura correlata [4], [9] e [10].

A. A Construção da MTDF

O primeiro ponto a ser considerado está relacionado com o tipo e a impedância de falta a ser considerada. Trabalhos que apresentam metodologias para otimização da alocação de monitores como [9] e [18], geralmente consideram curtos-circuitos francos na apresentação dos resultados. Deste modo, a MTDF reflete a robustez do sistema estudado frente aos curtos-circuitos sólidos aplicados, e os monitores são alocados em nós com uma grande área de vulnerabilidade. Outras pesquisas, como [10], optam por utilizar métodos estatísticos, como o Método de Monte Carlo, para considerar todos os tipos de falta que o sistema possa vir a enfrentar com diversos valores de resistência de falta.

No presente trabalho, o tipo de curto-circuito aplicado foi o de menor severidade (o qual menos causa ATs no SD), e o valor escolhido para a resistência (Ω) da falta foi o maior possível, com um limite estabelecido em 50 Ω . A razão dessa escolha para o tipo de falta ser a de menor severidade, está no fato presumido que caso a alocação dos monitores garanta a observação de fenômenos de baixa severidade, esta também conseguirá observar distúrbios de maior intensidade. Desse modo, o valor da resistência da falta também está atrelado à mesma justificativa, pois quanto maior o seu valor, menor será a severidade do distúrbio causado pela mesma.

B. A Construção da Matriz de Cobertura

Como anteriormente apresentado, a MTC pode ter mudanças na sua área afetada quando o limiar de construção é modificado. Quanto menor for este valor, menor será a área e mais esforços serão requeridos do sistema de monitoramento para garantir a observação de ATs, resultando no aumento do número de monitores necessários para tal. Esse artifício será utilizada em sistemas que requerem uma pequena quantidade de monitores para observar os possíveis ATs causados por curtos-circuitos (quando um limiar 0,9 p.u. é estabelecido) e uma expansão do sistema de monitoramento é desejada. Consequentemente, ao aumentar a quantidade de monitores instalados, uma melhora na observabilidade do SD e eficiência do sistema de monitoramento seriam observados.

Sendo assim, na análise do presente trabalho, serão consideradas configurações de alocação de monitores através de uma MTC com diferentes limiares de tensão, obtendo assim, bons pontos para alocação de monitores excedentes. Esta matriz será definida neste contexto do trabalho como MHC.

C. Algoritmo Genético

Algoritmos genéticos são métodos generalizados de busca e otimização que simulam os processos naturais de evolução, aplicando a ideia darwiniana de seleção. Estes algoritmos são baseados nos processos genéticos dos organismos biológicos, codificando uma possível solução a um problema de “cromossomo” composto por uma cadeia de bits e caracteres. Os cromossomos representam indivíduos que são levados ao longo de várias gerações de forma similar aos problemas naturais, evoluindo de acordo com os princípios de seleção

natural e sobrevivência dos mais aptos [14].

A determinação do número mínimo de monitores e sua alocação ótima são problemas correlacionados, pois através da instalação de monitores em nós estratégicos (nós com as maiores capacidades de observabilidade) [14], o esquema de alocação adotado contemplará o número mínimo de monitores. Sendo assim, o uso de AG para formular a solução desse problema caracteriza uma alternativa interessante, dado que o problema consiste em determinar a melhor configuração de alocação dentre muitas possibilidades.

Sendo o problema de alocação caracterizado por um problema de busca binária e de complexidade não elevada, optou-se por usar um AG na sua forma mais simples. Para isso, os seguintes parâmetros foram considerados: Cruzamento simples de um ponto, seleção dos melhores pais pelo método da roleta viciada, mutação com taxa de 5% nos primeiros passos de interação e aumento deste valor para uma maior diversidade quando o algoritmo estiver próximo da convergência e elitismo, para garantir a presença do melhor indivíduo encontrado em interações anteriores na próxima população.

O algoritmo desenvolvido tem como principal objetivo a busca pela quantidade mínima de monitores a fim de garantir o monitoramento de todos os AT causados pelas situações de faltas de baixa severidade passíveis de ocorrência no sistema elétrico. Sua principal restrição está relacionada ao fato de que todos os nós no SD devem ser observados nas situações de curtos-circuitos por pelo menos um monitor. E, adicionalmente, o problema tem como objetivo secundário a busca da solução com maior redundância das medidas.

IV. SISTEMA ELÉTRICO EM ANÁLISE

Para apresentar a metodologia proposta, um dos sistemas teste de distribuição de energia do IEEE foi escolhido. O sistema de 34 nós [11] é um sistema real, localizado no estado de Arizona, nos Estados Unidos. Sua tensão nominal é de 24,9 kV, e suas principais características são:

- Muito longo e levemente carregado (o comprimento do nó mais distante do tronco principal chega a 57,6 km com 2,05 MVA de carregamento);
- Dois reguladores de tensão;
- Um transformador abaixador para 4,16 kV, situado entre os nós #25 e #32;
- Cargas desbalanceadas concentradas e distribuídas; e
- Banco de capacitores shunt.

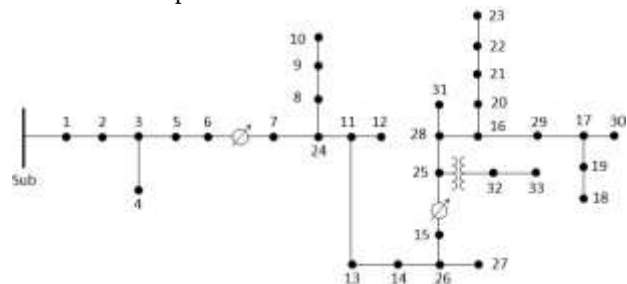


Fig. 2. Diagrama unifilar do sistema de 34 nós.

V. RESULTADOS

Depois da modelagem do sistema elétrico em análise através do software ATPDraw, várias situações e tipos de falta foram aplicadas em todo o SD. O principal objetivo está na observação de qual tipo de falta continha a intensidade menos severa, pois, conforme citado, a garantia da observação para este tipo de falta, traz a segurança que outros curtos-circuitos de severidade maior também serão observados caso ocorram. Da análise realizada, a falta com característica menos severa encontrada foi a do tipo monofásica envolvendo a fase B, coincidindo com a fase menos carregada do SD estudado.

Definido o tipo e resistência de falta, simulações foram realizadas em todos os nós do sistema para a construção da sua MTC. Por ter grande dimensão, esta será representada em sua forma gráfica e ilustrada através da Fig. 3, contemplando um limiar de 0,9 p.u. Onde, os pontos vermelhos representam os valores uns (1) e os cinza os zeros (0), que caracterizam a MTC.

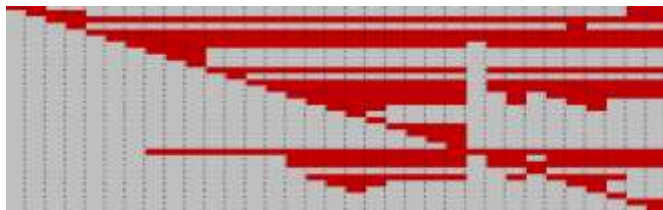


Fig. 3. Ilustração gráfica da MTC para um limiar de 0,9 p.u..

Dada matriz, os monitores devem ser alocados para que todos seus nós sejam observados em situações de AT (tensão residual menor que 0,9 p.u.).

Após executado o AG para a presente configuração de MTC, a solução encontrada foi na alocação de dois monitores nos nós #1 e #3 com redundância das medidas igual a 2.

A Fig. 4 ilustra a configuração da alocação dos monitores no sistema de 34 nós. Cabe mencionar que, ao considerar a distância entre os nós em uma escala representativa, a visualização dos nós é dificultada (alimentador muito longo). Nesta figura, os ramos verdes indicam ramais monofásicos referenciados à fase A, os azuis à fase B e os em laranja representam o ramo de menor tensão (secundário do transformador do sistema).

A alocação representada na Fig. 4 aponta a localização em que os monitores devem ser instalados para que todos os AT causados por faltas monofásicas envolvendo a fase B (menos severas) com impedância de falta com maior valor possível (máximo de 50 Ω) possam ser observados. Ou seja, acredita-se que a observação de AT em todos os outros nós estará garantida para todos os possíveis tipos de falta que possam vir a ocorrer sobre o SD em análise.

Porém, esta solução pode ser refinada caso a empresa ou concessionária de energia responsável pelo sistema de monitoramento queira uma maior redundância nas medidas e mais pontos de monitoramento. Para isto, a diminuição do

limiar adotado para a construção da MTC foi adotada, resultando na diminuição da área afetada na obtenção de bons pontos excedentes para a alocação otimizada.

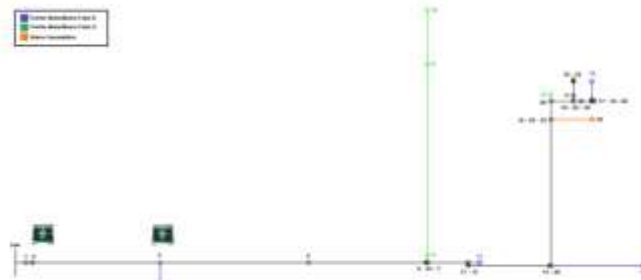


Fig. 4. Ilustração da alocação dos dois monitores para uma MTC com limiar de 0,9 p.u..

Todavia, um problema surge quando o limiar de tensão é diminuído para a construção da MTC. Se o limiar for diminuído, por exemplo, para 0,8 p.u., os nós que tinham tensões residuais entre 0,8 e 0,9 p.u. não poderão ser observados para a severidade da falta analisada, já que o valor 1 só aparece na matriz quando a tensão residual está abaixo do valor estipulado.

A solução adotada para este problema consiste em deixar os nós (colunas) com tensões residuais entre 0,8 e 0,9 p.u. com limiar de tensão 0,9 p.u., e adotar um novo limiar para os outros pontos do sistema. Assim, tem-se agora uma matriz composta por diferentes limiares que caracterizarão diferentes áreas afetadas, compondo uma MHC. Desse modo, a matriz pode ser confeccionada para diversos limiares de tensão. No presente trabalho, serão apresentados análises para os limiares adotados de 0,9 a 0,7 p.u. e de 0,9 a 0,5 p.u.

A Fig. 5 ilustra a MHC para limiares de 0,9 a 0,7 p.u. em que é possível identificar uma grande diminuição da área afetada pelas situações de faltas aplicadas.

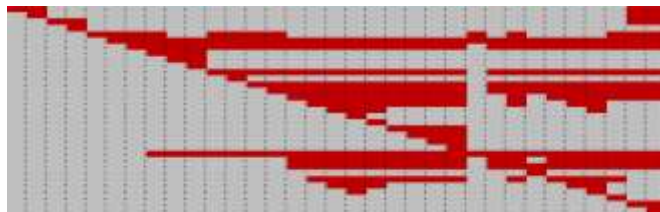


Fig. 5. Ilustração gráfica da MHC para limiares de 0,9 a 0,7 p.u..

Após executado o AG para esta MHC, a melhor solução encontrada foi através do esquema de alocação quatro monitores: nós #1, #3, #5 e #6, com uma redundância das medidas igual a 16. Apesar dos nós parecerem muito próximos em numeração, a Fig. 6 ilustra a configuração da alocação em escala.

O mesmo procedimento foi então aplicado para um limiar de tensão de 0,9 a 0,5 p.u.. O resultado depois de executado o AG é ilustrado na Fig. 7. A melhor configuração encontrada foi na alocação de oito monitores nos nós #1, #3, #5, #6, #9,

#14, #25 e #27, com uma redundância das medidas igual a 11.

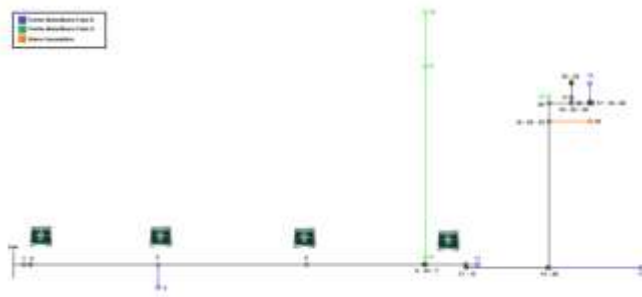


Fig. 6. Ilustração da alocação para uma MHC compreendendo os limiares de 0,9 a 0,7 p.u..

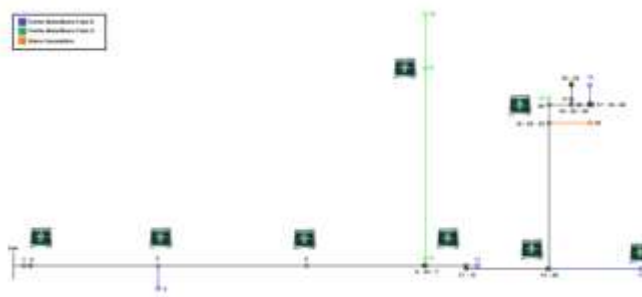


Fig. 7. Ilustração da alocação para uma MHC compreendendo os limiares de 0,9 a 0,5 p.u..

Vale frisar que, apesar da grande quantidade de monitores alocados na última configuração, e da presença de monitores em ramos monofásicos, a alocação nesses nós não são necessárias para garantir a observação dos AT, pois somente a configuração para um limiar de 0,9 p.u. já seria suficiente. No entanto, o profissional responsável pelo sistema de monitoramento consegue identificar localizações interessantes para a alocação de monitores.

VI. CONCLUSÃO

A magnitude e a propagação dos AT são pontos de muita importância na análise da robustez de um SD. O estudo realizado nesta pesquisa apresentou e discutiu uma metodologia para melhor observá-los de maneira otimizada. Por conseguinte, a MTC se mostrou uma boa alternativa para garantir a observação destes fenômenos quando o tipo e impedância de falta são escolhidos de maneira adequada. Adicionalmente, a MHC foi apresentada como uma interessante opção para a identificação dos nós sobre o SD no processo de ampliação do sistema de monitoramento.

Os resultados foram apresentados para diferentes limiares de tensão e se mostram satisfatórios, principalmente no tocante a um possível suporte para a função de localização das situações de faltas (advindas da diferenciação da MTC), a partir de espaçadas e bem definidas áreas (zonas) de cobertura.

Trabalhos futuros poderão ser responsáveis por não somente garantir a observação dos AT, mas também de permitir um melhor entendimento de como a configuração da alocação encontrada se relaciona com outros aspectos e fatores de problemas no contexto da qualidade da energia elétrica.

REFERÊNCIAS

- [1] M.H.J. Bohen and I.Y.H. Gu, "Signal Processing of Power Quality Disturbances," Nova York: IEEE Press, 2006.
- [2] G. Olguin, F. Vuinovich, e M.H.J. Bollen, "An Optimal Monitoring Program for Obtaining Voltages Sag System Indexes," IEEE Trans. Power Syst., vol. 21, no. 1, pp. 378-384, 2006.
- [3] M. Haghbin e E. Farjah, "Optimal Placement of Monitors in Transmission System using Fuzzy Boundaries for Voltage Sag Assessment," apresentado em IEEE Power Tech Conf., Bucharest, Romania, Junho 28 – Julho 2, 2009.
- [4] A.A. Ibrahim, A. Mohamed, e F H. Sharee, "Optimal placement of power quality monitors in distribution systems using the topological monitor reach area", em Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011 IEEE International, Mai. 2011, pp. 394-399.
- [5] B. L. Liu, e Q. L. Li, "The optimal allocation of power quality monitoring device" em J. Proceedings of the Chinese Society of Universities for Electric Power System and Automation, vol. 21 no. 6 pp.69-73, Dez. 2009.
- [6] Z. N. Wei, S. Wu, G. Q. Sun, L. F. Tang, e C. Wang, "Optimal placement of power quality monitors based on multi-objective evolutionary algorithm," em J. Power System Technology, vol. 36, no. 1, pp. 176-181, Jan. 2012.
- [7] A. Kazemi, A. Mohamed, e H. Shareef, "A Novel PQM Placement Method Using Cp and Rp Statistical Indices for Power Transmission and Distribution Networks". Em IEEE International Power Engineering and Optimization Conference. Selangor, Malasia. Junho 2011.
- [8] M. Oleskovicz, H.M.G.C. Branco, R.P.M. da Silva, D.V. Coury e A.C.B. Delbem, "A Compact Genetic Algorithm Structure Used for the Optimum Allocation of Power Quality Monitors Based on Electrical Circuit Topology". Em Harmonics and Quality of Power (ICHQP), IEEE 15th International Conference. Hong Kong. Junho 2012. Pp. 34 – 39.
- [9] A.A. Ibrahim, A. Mohamed, H. Shareef e S.P. Ghoshal, "Optimal Placement of Voltage Sag Monitors Based on Monitor Reach Area and Sag Severity Index". Em The 2010 IEEE Student Conference on Research and Development (SCoRD), Putrajaya, Malasia. Dez. 13-14, 2010.
- [10] J. C. Cebrian, C.F.M. Almeida, e N. Kagan. Genetic algorithms applied for the optimal allocation of power quality monitors in distribution networks. Em Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Bergamo, 26-29 Set. 2010. 1-10.
- [11] IEEE Distribution Test Feeders, "IEEE 13 Node Test Feeder", Available in: <<http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/>>.
- [12] ATPDraw – "Help and about ATPDraw" – Available in: <<http://www.atpdraw.net/help.php>>.
- [13] ATP – "About ATP" – Available in: <<http://www.emtp.org/>>.
- [14] C. F. M Almeida, e N. Kagan, "Allocation of Power Quality Monitors by Genetic Algorithms and Fuzzy Sets Theory". Intelligent System Applications to Power Systems, Curitiba , 8-12 Nov 2009. 6.
- [15] H. M. G. C. Branco, "Modelagem Multiobjetivo para o Problema da Alocação de Monitores de Qualidade de Energia em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica", Jul. 2013, pag. 114. Dissertação de Mestrado – USP São Carlos.
- [16] PRODIST. "Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica". ANEEL, 2014. Available in: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=82&idPerfil=2>>.
- [17] G. Olguin; M. H. J. Bollen. "Optimal Dips Monitoring Program for Characterization of Transmission System". IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2003.
- [18] T. R. Kempner, "A Robustez de um Sistema de Distribuição e a Alocação de Medidores de Qualidade de Energia Elétrica Frente aos Afectamentos de Tensão." Dissertação de Mestrado - USP, São Carlos, pag. 111, Março 2012.