

Monitoramento Otimizado de um Sistema de Distribuição Considerando a Alteração dos Perfis de Carregamento

Thais Reggina Kempner, Fabrício A. Mourinho

Fernando B. Bottura, Mário Olesckovicz

José Carlos Melo de Vieira Júnior

Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação

USP, Escola de Engenharia de São Carlos

São Carlos-SP, Brasil

kempner@usp.br, mourinhofabricio@usp.br,

fernando.bottura@usp.br, olesk@sc.usp.br,

jcarlos@sc.usp.br

José Ribamar de Lima Filho

Gerência de Pesquisa,

Desenvolvimento e Eficiência Energética - DRRD

Eletrobrás Distribuição Piauí – EDPI

Teresina-PI, Brasil

ribamarlima@eletrobraspiaui.com

Resumo— Esta pesquisa tem como objetivo avaliar a influência de distintos perfis de carregamento dos Sistemas de Distribuição (SD), no processo da alocação otimizada de monitores de Qualidade da Energia Elétrica (QEE). Para tanto, é apresentada uma metodologia de alocação que considera diferentes situações de carregamento sobre o sistema teste do IEEE de 34 nós. O método de alocação de monitores de QEE, fundamentado no algoritmo *branch and bound*, considera a aplicação de circuitos monofásicos sobre o SD com diferentes resistências de falta, para cada uma das situações de carregamento estudadas. A partir do cálculo de um fator de observabilidade e sua posterior ponderação no processo de otimização, a instalação dos monitores é prioritária nos locais em que favoreçam a observação dos nós mais sensibilizados frente aos afundamentos de tensão. Os resultados sugerem fortes indícios de que a alocação de monitores QEE pode ser realizada considerando-se o sistema sem cargas.

Palavras-chave -- Afundamentos de Tensão, Alocação Ótima de Medidores, Qualidade da Energia Elétrica, Sistemas de Distribuição.

I. INTRODUÇÃO

Os Sistemas de Distribuição (SD) de energia elétrica, especialmente os baseados em linhas aéreas, estão sujeitos a diferentes tipos de perturbações e defeitos, oriundos, principalmente, de adversidades climáticas, falhas humanas, contatos de animais e árvores em partes energizadas, defeitos em equipamentos, entre outros.

Consequentemente, a ocorrência de defeitos em SD altera as condições ideais de fornecimento da energia elétrica para os consumidores, o que pode se traduzir em uma deterioração da Qualidade da Energia Elétrica (QEE). Dentre todos os distúrbios passíveis de ocorrência em redes elétricas, as

variações de tensão de curta duração, e destas em específico, os afundamentos de tensão, são os distúrbios que apresentam maior ocorrência e de rápida percepção por parte dos consumidores [1], [2].

O afundamento de tensão é conceitualmente definido como uma variação de tensão de curta duração com amplitude remanescente (valor eficaz) entre 0,1 p.u. e 0,9 p.u. da tensão nominal, e duração inferior ou igual a um minuto [3].

Apesar da curta duração, este distúrbio tem sido considerado como uma das maiores causas de reclamações por parte dos clientes finais, uma vez que podem provocar o mau funcionamento de equipamentos sensíveis às variações na tensão de alimentação, interrompendo processos industriais e gerando prejuízos consideráveis [4].

Neste sentido, prever com precisão o desempenho de SD frente aos afundamentos torna-se uma tarefa complexa, que exige um grande número de medições para coleta, registro e processamento dos dados, e ainda, a permanência e a dependência de medidores instalados em todos os nós do sistema para um monitoramento eficaz. Esta complexa tarefa, além de ser financeiramente inviável, demanda de um período de tempo muito grande para formar uma base de dados realmente representativa para estudos.

Dentro deste contexto, diversos trabalhos apresentam alternativas para prever o desempenho do sistema frente à ocorrência de afundamentos de tensão para, posteriormente, determinar alocações otimizadas de medidores de forma a diminuir os custos de aquisição e manutenção dos monitores de QEE [5]-[11].

Apesar da eficiência dos trabalhos reportados, nem sempre os estudos são direcionados para SD, e quando os são, tais estudos consideram um único perfil de carga do SD em

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 Eletrobrás Distribuição Piauí - EDPI pelo suporte financeiro disponibilizado para a realização deste projeto de pesquisa e desenvolvimento (PD-0042/2014-ANEEL).

questão para a alocação dos monitores. Contudo, neste único cenário, não se sabe, e não se pode inferir, sobre a eficácia dos resultados apresentados durante outra condição de operação do sistema. Sendo assim, como as cargas dos SD variam significativamente ao longo do dia, justifica-se então a necessidade do estudo da alocação otimizada de monitores de qualidade da energia considerando diferentes perfis de carga do SD em análise.

Neste sentido, esta pesquisa propõe avaliar o comportamento do algoritmo *branch and bound* para a alocação ótima de monitores de QEE em SD considerando diferentes cenários de carregamento. O SD utilizado como base neste trabalho será o sistema de distribuição teste de 34 nós do IEEE [12], e os cenários analisados serão obtidos através da variação das cargas de tal sistema. A utilização da metodologia proposta proporcionará importantes informações referentes à magnitude dos afundamentos, ilustrando a influência e a propagação do distúrbio em todos os nós do sistema.

Após a utilização do algoritmo *branch and bound*, será determinado o número ótimo de medidores de QEE, bem como os nós onde os mesmos devem ser instalados para monitorar todo o SD frente aos afundamentos de tensão. A localização dos monitores, obtidos por meio do algoritmo proposto, assegurará que qualquer evento caracterizado por um afundamento de tensão será capturado por pelo menos um monitor de tensão alocado no SD.

Devido às várias soluções possíveis, adicionalmente, será ainda determinado neste trabalho um fator de observabilidade, que irá auxiliar na escolha entre as soluções a serem obtidas, de forma a priorizar a alocação dos monitores nos barramentos que possuírem maior observabilidade, possibilitando a escolha do arranjo de monitores que seja mais sensibilizado pelos afundamentos de tensão.

II. METODOLOGIA

A. Modelagem computacional do SD via o ATP

Tradicionalmente, grande parte das medições disponíveis em SD se encontra na saída da subestação de energia, não sendo monitoradas em tempo real as grandezas elétricas ao longo do alimentador [13]. Neste sentido, muitos eventos que ocorrem nos alimentadores, e que deterioram a QEE entregue aos consumidores, não são monitorados, tampouco avaliados pela concessionária de energia elétrica. Adicionalmente, as cargas dos SD variam significativamente ao longo do dia [13], mas por falta de monitores instalados nos SD direcionados a acompanhar o comportamento dinâmico e aleatório das cargas, é difícil a representação exata do carregamento dos SD para a realização de estudos detalhados.

Os trabalhos de [5]-[11] apontam resultados a respeito da alocação otimizada de monitores de QEE. Entretanto, alguns abordam o estudo focado em sistemas de transmissão, e os trabalhos que abrangem SD consideram apenas um cenário de carregamento do sistema, dificultando garantir e generalizar a qualidade e eficiência dos resultados para outros cenários.

Diferentemente de tais trabalhos, este estudo propõe avaliar quatro diferentes cenários de um mesmo SD para a alocação ótima de monitores de QEE, a fim de avaliar se o carregamento do sistema influenciará, ou não, de maneira direta nos resultados. Conforme anteriormente mencionado, o SD utilizado para as análises é o SD teste do IEEE de 34 nós [12], o qual é apresentado na Fig. 1. Tal sistema foi modelado dispondo do *software* ATP (*Alternative Transients Program*) via a interface ATPDraw [14]. Neste trabalho, todas as cargas foram modeladas como impedância constante, as quais foram calculadas em função da potência e da tensão de operação fornecida por [12].

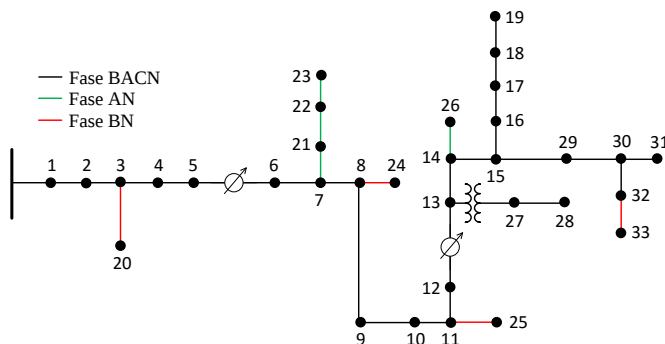


Figura 1. Diagrama unifilar do SD de 34 nós do IEEE modificado.

O tronco principal deste SD apresenta 57,6 km de extensão, tensão nominal de 24,9 kV e carregamento de aproximadamente 2,05 MVA. Para manter o perfil de tensão dentro de um patamar aceitável este sistema apresenta dois reguladores de tensão e dois bancos de capacitores em derivação. Destaca-se que este sistema apresenta cargas desbalanceadas, dividindo-se entre cargas fixas e cargas distribuídas. Os nós 27 e 28 deste sistema são os únicos com tensão igual a 4,16 kV. Os quatro cenários de carga estabelecidos para as análises são descritos brevemente na sequência.

O primeiro cenário, consiste no carregamento normal do SD, sendo o mesmo fornecido pelo IEEE [12]. O segundo cenário, carga pesada, foi determinado ao aumentar em 20 % a potência ativa e reativa de todas as cargas do sistema. Neste caso, o carregamento do sistema passou para aproximadamente 2,5 MVA. O terceiro cenário, carga leve, foi estabelecido ao diminuir em 20 % a potência ativa e reativa de todas as cargas do sistema em relação ao sistema original. Neste caso, o carregamento do sistema passou para aproximadamente 1,65 MVA. Destaca-se que o tap dos reguladores de tensão e as potências nominais dos bancos de capacitores foram mantidos constantes para os três cenários apresentados. Por fim, o quarto cenário consiste na aproximação clássica para cálculos de curto-circuito, onde as cargas, os bancos de capacitores e os reguladores de tensão são desconsiderados na análise [13]. Este cenário é uma alternativa mais simples para estudos que envolvam curtos-circuitos e para casos onde informações precisas das cargas ao longo do SD não são conhecidas.

A Fig. 2 ilustra o perfil de tensão da fase “a” dos quatro cenários avaliados para todos os nós do SD teste. Pela figura,

pode-se observar que o cenário de carga leve é o que apresenta as maiores tensões pré-falta, devido ao menor carregamento e, consequentemente, menores quedas de tensão ao longo do alimentador. De maneira complementar, por apresentar o maior carregamento, o cenário de carga pesada apresenta as menores tensões em regime permanente.

A escolha de cenários extremos (carga pesada e carga leve) para as análises nesta pesquisa foi devido ao fato de que é tecnicamente difícil e inviável a representação de todas as combinações de carregamento do sistema. Desta forma, optou-se pela análise de tais condições extremas em conjunto com o cenário de carregamento normal.

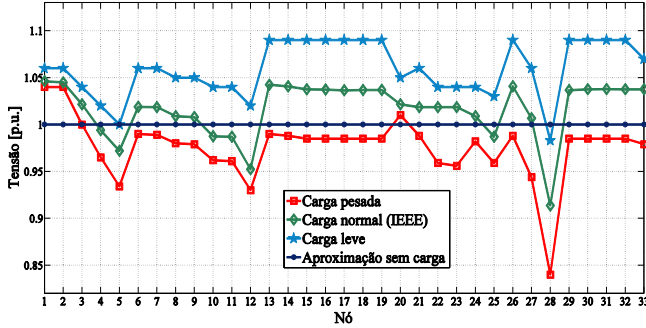


Figura 2. Perfil de tensão da fase “a” dos cenários avaliados.

Na sequência, a metodologia adotada consistiu em aplicar curtos-circuitos monofásicos em todos os nós do SD teste. Nesta pesquisa, optou-se pela aplicação das faltas na fase “a”, e em seguida, registraram-se as tensões remanescentes durante a falta em todos os nós do sistema, de forma a se obter uma Matriz de Tensão Durante a Falta (MTDF). Neste sentido, cada coluna da MTDF representa a posição onde a falta foi aplicada. Já nas linhas são armazenadas as amplitudes das tensões remanescentes registradas em cada nó do SD devido à aplicação do curto-circuito. O curto-circuito monofásico foi adotado uma vez que é o tipo de falta que tem a maior probabilidade de ocorrência em sistemas de distribuição aéreos de energia elétrica [13]. Saliencia-se que nos nós 20, 24, 25 e 33 do SD teste foi aplicado o curto-circuito na fase “b”, pois estes trechos são monofásicos e não envolvem a fase “a”. Para estes casos, foi monitorada a tensão durante a falta na fase “b” de todos os outros nós do sistema.

Adicionalmente, este trabalho propõe a análise de curtos-circuitos monofásicos com resistência de falta igual a 0 (zero) e a 40 Ω . Neste sentido, para cada um dos quatro cenários, serão executadas 33 simulações de curto-circuito para cada uma das duas resistências de falta, totalizando 264 simulações de falta no SD.

Em seguida, a MTDF é obtida para as três fases do sistema, onde são armazenados os valores das tensões remanescentes pós-falta em cada nó, devido às simulações de curto-circuito. Logo, para cada perfil de carregamento e respectivo valor de resistência de falta associada, serão obtidas 24 MTDF, que após o processo de agregação de fases resultarão em oito matrizes de afundamentos de tensão que serão utilizadas como entrada do algoritmo de alocação de monitores de QEE, o qual é apresentado na sequência.

B. O problema de otimização

Da prática, sabe-se do alto investimento necessário para a aquisição e manutenção de equipamentos de monitoração de QEE, que possibilitem o monitoramento completo do SD. Sendo assim, o problema de otimização formulado visa determinar um número mínimo de monitores necessários para monitorar os afundamentos de tensão, bem como os nós onde os mesmos devem ser instalados para a detecção do maior número de eventos que o SD venha a ser submetido.

Com o intuito de quantificar o alcance da monitoração de um medidor instalado em um determinado ponto do SD, após a determinação de cada matriz de afundamentos de tensão, define-se um limiar de tensão (τ), compreendido entre 0,9 e 0,1 p.u., a partir do qual se deseja que os medidores sejam sensibilizados, dando origem a uma Matriz de Observabilidade Binária (MOB). Desta forma, as posições da MOB são preenchidas com 0 (zero), caso o valor da tensão remanescente observada não ultrapasse o valor fixado, e com 1 (um) quando ocorrer a infração desse limite.

A fim de determinar as melhores posições em que os medidores de QEE devem ser instalados de forma a garantir a observabilidade máxima do sistema analisado, utilizou-se o algoritmo *branch and bound*. Este é um algoritmo exato de enumeração implícita, cuja estrutura de resolução se baseia na construção de uma árvore fundamentada na programação linear para explorar o espaço de busca [15].

A função objetivo do problema é uma função de minimização (1). Pela sua definição, busca-se minimizar o somatório dos elementos do vetor monitoração (X) associando a prioridade (P) de instalação dos monitores conforme a maior observabilidade dos afundamentos de tensão.

$$\min f(x) = \sum_{i=1}^n x_i p_i = X \cdot P^t \quad (1)$$

O vetor de monitoração X , de dimensão $n \times 1$, fixada de acordo com o número n de nós do SD em análise, é um vetor binário que irá fornecer a resposta ao problema da alocação ótima de monitores, indicando o número mínimo de equipamentos necessários para monitorar as possíveis faltas no SD, bem como em quais nós os mesmos devem ser instalados. Desta forma, a decisão pela instalação de um monitor ou não em um determinado nó é feita através do preenchimento de cada uma das posições do vetor. As mesmas são então preenchidas por 0 (zero) ou 1 (um), indicando a não instalação, ou a instalação de um monitor, respectivamente.

Já o vetor prioridade P é um vetor coeficiente do vetor X , e tem a mesma dimensão $n \times 1$. Para cada elemento do vetor P , é viável associar pesos, com relação à prioridade de instalação do monitor conforme a maior sensibilidade aos afundamentos de tensão. Para determinar o vetor P é calculado, para cada possível ponto de instalação do monitor, um Fator de Observabilidade (FO) das medidas, que indicará a média de quantos afundamentos de tensão serão monitorados por cada nó, conforme (2).

$$FO = \frac{\sum_{i=1, j=1}^n mob_{ij} \cdot x_i}{n} \quad x_i = \begin{cases} 1, & \text{se } i = j \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2)$$

Obtido o FO para todos os possíveis pontos de alocação dos monitores, definem-se os nós que serão prioritários na busca da solução ótima, atribuindo aos nós que possuem maior observabilidade um valor inferior aos demais elementos do vetor P . Desta forma, as posições do vetor P são ranqueadas em ordem crescente, ou seja, da maior para a menor observabilidade.

Assim, os menores coeficientes inteiros serão prioritários na busca da solução ótima. Portanto, se houver uma solução factível que englobe a variável penalizada, o algoritmo fornecerá a solução ótima priorizando a instalação do medidor nos nós com os menores coeficientes, ou seja, aos nós que possuem maior observabilidade.

Após atribuir os pesos para cada elemento do vetor prioridade, propicia-se uma observação do sistema como um todo através da alocação ótima de medidores que visa estabelecer a melhor localização de um número reduzido de monitores de QEE.

Vale comentar que, apesar de ter sido utilizado neste trabalho o algoritmo *branch and bound* para a obtenção dos resultados, caso a complexidade computacional do problema aumente, a metodologia pode ser facilmente aplicada dispondo de métodos heurísticos e ou outras ferramentas de otimização que se utilizem de lógica binária. O importante é que a função objetivo seja de minimização, como ilustra a equação (1).

Conforme formulado o problema, as restrições devem garantir que cada afundamento de tensão que ocorra no SD seja visualizado por pelo menos um medidor instalado. Para que esta condição se estabeleça, o produto vetorial entre a MOB^t e o vetor X deve ser maior ou igual a 1 (um), conforme (3).

$$\text{Sujeito à: } \sum_{i=1}^n mob_{ij} \cdot x_i \geq 1 \quad (3)$$

Assim, para cada perfil de carregamento e respectivo valor de resistência de falta analisados, o algoritmo deverá fornecer uma resposta ótima, considerando cada limiar de tensão escolhido, além de priorizar a instalação dos monitores nos nós com maior observabilidade.

III. RESULTADOS

Conforme exposto no item A da seção II, para avaliar a metodologia proposta, escolheu-se o sistema teste de distribuição de 34 nós do IEEE considerando quatro perfis de carregamento (Fig. 2) e dois valores de resistência de falta (0 e 40Ω) para a aplicação dos curtos-circuitos monofásicos.

Para cada resistência de falta foram obtidas quatro matrizes de afundamento de tensão, uma para cada perfil de carregamento. Posteriormente, seguindo a metodologia apresentada no item B da seção II foi necessário definir os

limitares de tensão a serem analisados, o que geralmente não é uma tarefa fácil, pois, quanto maior o limiar analisado, maior será a sensibilidade do monitor. Em contrapartida, menor será a redundância das medidas devido a um número menor de monitores ser requerido para caracterizar o desempenho do SD, o que pode comprometer a confiabilidade da monitoração, além de sobrecarregar a capacidade de armazenamento do equipamento.

Para auxiliar nesta etapa, inferiu-se sobre a probabilidade da ocorrência dos afundamentos de tensão baseado na pesquisa de [16], onde é relatado que aproximadamente 90% dos afundamentos de tensão registrados, apresentam tensões remanescentes entre 50 e 85% da tensão eficaz. Portanto, optou-se em demonstrar os resultados obtidos para os limites compreendidos entre 0,4 p.u. à 0,9 p.u., fato este que implica na obtenção de 6 MOB para cada matriz de afundamento de tensão, totalizando, portanto, 48 MOB, correspondentes às 8 matrizes de afundamentos de tensão obtidas no cálculo de curto-circuito via o *software* ATP.

Para cada uma das 48 MOB o algoritmo *branch and bound* foi executado para a obtenção do número mínimo de monitores e suas localizações de instalação. Entretanto, a cada execução do algoritmo era obtida uma resposta diferente, que divergia em relação ao local onde o equipamento de medição deveria ser instalado, em virtude das diversas soluções possíveis disponíveis, o que impossibilitava a comparação dos resultados de forma a verificar se o perfil de carregamento afetava a alocação dos medidores de QEE.

Desta maneira, para obter uma solução que abrangesse todos os perfis de carregamento considerados, bem como as duas impedâncias de falta de 0 e 40Ω, foi calculado um fator de observabilidade de forma a verificar os nós capazes de observar um maior número de distúrbios.

As Tabelas 1 e 2 mostram os valores do FO, calculados pela equação (2), referentes a todos os perfis de carregamento considerados e impedância de falta de 0 Ω (franco).

TABELA I. FO PARA O SD SEM CARGA E COM CARREGAMENTO NORMAL, AMBOS PARA CURTOS-CIRCUITOS FRANCOS.

Nós	Sem carga	Carregamento Normal	Nós	Sem carga	Carregamento Normal
1	2,2727	2,0000	18	8,4242	8,3939
2	2,4242	2,0303	19	8,4242	8,3939
3	4,1515	3,6667	20	4,1818	3,6970
4	5,5758	5,3636	21	6,5152	6,4545
5	6,5152	6,5758	22	6,7273	6,6970
6	6,5152	6,4545	23	6,7273	6,6970
7	6,5152	6,4545	24	7,0000	6,9091
8	7,0000	6,9091	25	7,6061	7,5455
9	7,0000	6,9091	26	8,4242	8,3939
10	7,5152	7,5152	27	8,5758	8,5455
11	7,5758	7,5152	28	8,7273	8,6667
12	8,3939	8,4242	29	8,4242	8,3939
13	8,4242	8,3636	30	8,4242	8,3939
14	8,4242	8,3939	31	8,4242	8,3939
15	8,4242	8,3939	32	8,4242	8,3939
16	8,4242	8,3939	33	8,4242	8,3939
17	8,4242	8,3939			

Conforme mencionado anteriormente, o algoritmo de alocação ótima prioriza a instalação dos monitores nos nós com o maior fator de observabilidade, atribuindo a estes nós um índice menor ao vetor P em comparação com os nós menos sensibilizados pelos afundamentos de tensão. Logo, para os resultados apresentados nas Tabelas 1 e 2 o vetor prioridade foi determinado conforme a Tabela 3.

TABELA II. FO PARA O SD COM CARREGAMENTO LEVE E PESADO, AMBOS PARA FALTAS FRANCS.

Nós	Carga leve	Carga pesada	Nós	Carga leve	Carga pesada
1	2,0000	2,0000	18	8,3939	8,3939
2	2,0303	2,0303	19	8,3939	8,3939
3	3,6364	3,6970	20	3,6667	3,7273
4	5,3333	5,3636	21	6,4545	6,4545
5	6,5455	6,6061	22	6,6667	6,7576
6	6,4545	6,4545	23	6,6970	6,7576
7	6,4545	6,4545	24	6,9091	6,9091
8	6,9091	6,9091	25	7,5455	7,5455
9	6,9091	6,9394	26	8,3939	8,3939
10	7,5152	7,5152	27	8,5758	8,5758
11	7,5152	7,5152	28	8,6970	8,6970
12	8,3939	8,4545	29	8,3939	8,3939
13	8,3636	8,3636	30	8,3939	8,3939
14	8,3939	8,3939	31	8,3939	8,3939
15	8,3939	8,3939	32	8,3939	8,3939
16	8,3939	8,3939	33	8,3939	8,3939
17	8,3939	8,3939			

TABELA III. PRIORIDADE DE INSTALAÇÃO DOS MONITORES PARA TODOS OS PERFIS DE CARGA PARA CURTOS-CIRCUITOS FRANCS.

Prioridade de instalação dos monitores conforme o FO													
Carga:	(1)	(2)	(3) ... (12)	(13)	(14) ... (22)	(23) ... (26)	(27)	(28)	(29) ... (33)				
Sem	15	14	13 ... 4	3	3 ... 9	9 ... 3	2	1	3 ... 3				
Leve	16	15	14 ... 3	4	3 ... 9	8 ... 3	2	1	3 ... 3				
Normal	17	16	15 ... 3	5	4 ... 9	10 ... 4	2	1	4 ... 4				
Pesada	17	16	15 ... 3	5	4 ... 10	10 ... 4	2	1	4 ... 4				

Como mostra a Tabela 3, o nó 28 recebeu prioridade 1 para todos os perfis de carregamento, ou seja, este nó foi o mais sensibilizado pelos afundamentos de tensão considerando os diferentes cenários analisados. Definido o vetor P , o algoritmo *branch and bound* foi executado e se obteve as respostas ótimas globais, conforme apresentadas nas Tabelas 4 e 5. Como o nó 28 fazia parte da solução factível para todos os casos analisados, na busca da solução ótima este nó foi priorizado, obtendo-se uma resposta compatível que permite afirmarmos que, mesmo alterando o carregamento do SD para $\pm 20\%$, o local e o número de monitores não se alterou para os limiares de 0,9 p.u. à 0,5 p.u..

Para o limiar de 0,4 p.u., como mostra a Tabela 4, para o cenário de carga leve, o algoritmo forneceu como resposta a alocação no nó 23, ao invés do nó 22. Isso porque este nó foi definido prioritário na busca da solução (Tabela 3). Entretanto, tanto o barramento 22 como o barramento 23 são soluções ótimas possíveis e comuns para todos os perfis de carregamento como pode ser verificado na Tabela 6.

Na Tabela 4 também observa-se que para o caso de carregamento pesado, considerando o limiar de 0,4 p.u.,

somente um monitor foi necessário para diagnosticar os afundamentos de tensão, enquanto que para os demais cenários são necessários dois monitores. Isto é justificável pelo fato deste cenário apresentar menores valores de tensão pré-falta (Fig. 2), e, portanto, os afundamentos de tensão foram mais severos após a ocorrência da falta.

TABELA IV. ALOCAÇÃO ÓTIMA PARA FALTAS MONOFÁSICAS FRANCS.

τ (p.u.)	Número de monitores/ {Local de instalação}			
	Sem carga	Carga leve	Normal	Carga pesada
$\leq 0,9$	1 / {28}	1 / {28}	1 / {28}	1 / {28}
$\leq 0,8$	1 / {28}	1 / {28}	1 / {28}	1 / {28}
$\leq 0,7$	1 / {28}	1 / {28}	1 / {28}	1 / {28}
$\leq 0,6$	1 / {28}	1 / {28}	1 / {28}	1 / {28}
$\leq 0,5$	1 / {28}	1 / {28}	1 / {28}	1 / {28}
$\leq 0,4$	2 / {22; 28}	2 / {23; 28}	2 / {22; 28}	1 / {28}

Ainda na Tabela 4 é demonstrado que com a diminuição do limiar adotado, tem-se a opção da instalação de mais monitores, o que propiciaria uma maior redundância nas medidas. Assim, dependendo do número de equipamentos disponíveis pela concessionária de energia, ou dos limites orçamentários para a aquisição dos mesmos, pode-se aumentar a observabilidade e confiabilidade do SD e, consequentemente, a eficiência do sistema de monitoramento implementado.

Na Tabela 5 são ilustrados os resultados obtidos para todos os perfis de carregamento quando simuladas faltas monofásicas com resistência de 40Ω . Apesar de o algoritmo ter sido executado para todos os limiares de tensão, com o aumento da impedância de falta, os afundamentos de tensão não foram tão acentuados, portanto, houve apenas soluções factíveis para os maiores limiares de tensão.

TABELA V. ALOCAÇÃO ÓTIMA PARA FALTAS MONOFÁSICAS COM RESISTÊNCIA DE 40Ω .

τ (p.u.)	Número de monitores/ {Local de instalação}			
	Sem carga	Carga leve	Normal	Carga pesada
$\leq 0,9$	1 / {28}	1 / {28}	1 / {28}	1 / {28}
$\leq 0,8$	-	1 / {28}	1 / {28}	1 / {28}
$\leq 0,7$	-	-	-	1 / {28}

Pelos resultados apresentados nas Tabelas 4 e 5 fica evidente que apenas um monitor instalado no barramento 28 seria suficiente para monitorar os afundamentos de tensão decorrentes de curtos-circuitos monofásicos, mesmo ocorrendo variações de carga. Este fato demonstra que, caso sejam desconsideradas as informações das cargas na modelagem do SD, muitas vezes por falta de informações precisas das mesmas, a eficácia do monitoramento não será afetada.

Sabendo que a confiabilidade do SD pode aumentar conforme o número de monitores instalados, as soluções devem ser apresentadas de modo que possibilitem ao operador do SD estabelecer o melhor arranjo de monitores. Neste contexto, nas Tabelas 6 e 7 são apresentadas outras possíveis soluções condizentes para todos os perfis de carga. Os resultados são exibidos seguindo a ordem prioritária de instalação dos monitores, de forma que seja possível consultar

quais barramentos tem maior capacidade de monitoração dos afundamentos de tensão. Além disso, são informados os números totais de soluções possíveis para cada limiar de tensão.

TABELA VI. OUTRAS SOLUÇÕES COMUNS A TODOS OS PERFIS DE CARGA CONFORME A PRIORIDADE DE INSTALAÇÃO (CURTOS-CIRCUITOS FRANCOS).

τ (p.u.)	Número de soluções	Possíveis soluções para a instalação dos monitores
$\leq 0,9$	29	{28},{27},{12},{14},{17},{19},{26},{29},{31},{33},{13},{25},..., {4}
$\leq 0,8$	19	{28},{27},{12},{14},{17},{19},{26},{29},{31},{33},{13},{25},..., {10}
$\leq 0,7$	2	{28},{27}
$\leq 0,6$	2	{28},{27}
$\leq 0,5$	1	{28}
$\leq 0,4$	2	{22;28}, {23;28}

TABELA VII. OUTRAS SOLUÇÕES COMUNS A TODOS OS PERFIS DE CARGA CONFORME A PRIORIDADE DE INSTALAÇÃO (CURTOS-CIRCUITOS COM RESISTÊNCIA DE FALTA DE 40 Ω).

τ (p.u.)	Possíveis soluções para a instalação dos monitores			
	Sem carga	Carga leve	Normal	Carga pesada
$\leq 0,7$	-	-	-	{28}
$\leq 0,8$	-	{28}	{28},{12},{5}	{28},{27},{12},{25},{10},{11},{22},{23},{5}
$\leq 0,9$	{28},{27},{12},{14},{15},{16},{17},{18},{19},{26},{29},{30},{31},{32},{33},{13},{25},{11},{10},{5},{9},{8},{24},{23},{22},{21},{6},{7},{4}			

IV. CONCLUSÕES

A metodologia de alocação de monitores proposta nesta pesquisa foi capaz de indicar os melhores pontos de instalação dos monitores, garantindo a observação dos afundamentos de tensão para um amplo cenário de operação a que o SD possa ser submetido.

As soluções de alocação dos monitores fornecidas pela metodologia contemplam distintas simulações de curtos-circuitos, incluindo-se a variação da resistência de falta (0 e 40 Ω) em todos os nós do SD teste. Além disso, para estas simulações de curtos-circuitos, quatro distintos níveis de carregamento do sistema foram analisados, tendo em vista a necessidade em se investigar a influência destas condições de operação do SD no desempenho da metodologia de alocação proposta.

Os resultados revelam que a partir do cálculo do fator de observabilidade dos possíveis pontos de alocação do sistema, o algoritmo de alocação pode priorizar a instalação dos monitores em locais que favoreçam a observação dos nós mais sensibilizados pelos afundamentos de tensão. Por esta abordagem, afirma-se que a instalação de apenas um monitor no nó 28 do SD teste é capaz de monitorar os afundamentos de tensão decorrentes de curtos-circuitos monofásicos frente a variações de carga do SD ($\pm 20\%$), quando considerado o limiar entre 0,5 p.u. e 0,9 p.u.. Caso o limiar seja reduzido para um valor $\leq 0,4$ p.u. verifica-se mais de uma opção de instalação de monitores, porém, ambas contendo o nó 28. Cabe ressaltar que a redução do limiar acarretará numa maior

redundância nas medidas, porém exigirá um maior número de monitores.

É importante destacar que a convergência do local de instalação dos monitores, indicada pela metodologia de alocação para todos os perfis de carregamento do SD considerado, sugere fortes indícios de que a alocação de monitores QEE pode ser realizada considerando-se o sistema sem cargas. De fato, uma vez que existem entraves na obtenção de informações precisas para todas as cargas do SD a serem modeladas computacionalmente, afirma-se que o estudo de alocação de monitores, considerando-se apenas o sistema sem cargas, apresenta-se como uma alternativa viável e segura, proporcionando, portanto, um monitoramento amplo e adequado dos afundamentos de tensão.

REFERÊNCIAS

- [1] M. F. Mcranaghan, D. R. Mueller, M. J. Samotyj, "Voltage Sags in Industrial Systems," Industry Applications, IEEE Transactions on, vol.29, no.2, pp.397-403, Mar/Apr 1993.
- [2] M. H. J. Bollen, M. R. Qader, R. N. Allan, "Stochastic and statistical assessment of voltage dips," Tools and Techniques for Dealing with Uncertainty (Digest No. 1998/200), IEE Colloquium on , pp.5/1-5/4, 27 Jan 1998.
- [3] IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, IEEE Standard 1159 – 1995, Nov. 1995.
- [4] M. H. J. Bollen, "Voltage sag: Effects, Mitigation and Prediction," Power Engineering Journal, vol.10, no.3, pp.129-135, June 1996.
- [5] G. Olguin, F. Vuinovich, M. H. J. Bollen, "An optimal monitoring program for obtaining voltage sag system indexes," Power Systems, IEEE Transactions on , vol.21, no.1, pp. 378- 384, Feb. 2006.
- [6] D. C. S. Reis, P. R. C. Villela, C. A. Duque, P. F. Ribeiro, "Transmission Systems Power Quality Monitors Allocation," Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE , pp.1-7, 20-24 July 2008.
- [7] E. Espinosa-Juárez, A. Hernandez, G. Olguin, "An Approach Based on Analytical Expressions for Optimal Location of Voltage Sags Monitors," Power Delivery, IEEE Transactions on , vol.24, no.4, pp.2034-2042, Oct. 2009.
- [8] C. F. M. Almeida, N. Kagan, "Allocation of Power Quality Monitors by Genetic Algorithms and Fuzzy Sets Theory," Intelligent System Applications to Power Systems, 2009. ISAP '09. 15th International Conference on, vol., no., pp.1.6, 8-12 Nov. 2009.
- [9] F. Salim, K. M. Nor, "Voltage sags observation through optimal monitor locations," In Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2010 14th International Conference on.
- [10] M. Oleskovicz, H.M.G.C Branco, R.P.M. da Silva, D. V. Coury, A.C.B. Delbem, "A Compact Genetic Algorithm structure used for the optimum allocation of power quality monitors based on electrical circuit topology," in Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2012 IEEE 15th International Conference on , vol., no., pp.34-39, 17-20 June 2012.
- [11] T.R Kempner, A.Q Santos, M. Oleskovicz, "Optimized monitoring of voltage sags in distribution systems caused by balanced and unbalanced short-circuits," in PES General Meeting | Conference & Exposition, 2014 IEEE , pp.1-5, 27-31 July 2014.
- [12] IEEE PES Test Feeders, "Distribution System Analysis Subcommittee," IEEE Power Engineering Society, Available: <http://www.ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders.html>
- [13] W. H. Kersting, *Distribution System Modeling and Analysis*, 2nd ed. Boca Raton, Florida USA. CRC Press LLC. 421p., 2007.
- [14] ATPDraw, "Help and about ATPDraw", Available: <http://www.atpdraw.net/help.php>.
- [15] L. A. Wolsey, *Integer Programming*, John Wiley & Sons, ISBN: 9780471283669, 1998.
- [16] EPRI – Electric Power Research Institute. Distribution System Power Quality Assessment: Phase II. Voltage Sag and Interruption Analysis. Project Manager A. Sundaram. pp 5 – 17, 2003.