



**XXIV SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

CB/GDS/29

22 a 25 de outubro de 2017  
Curitiba - PR

**GRUPO - 10**

**GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS**

**O MONITORAMENTO DOS AFUNDAMENTOS DE TENSÃO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO POR MEIO DE  
UMA ALOCAÇÃO PRÁTICA E DIRETA DE MEDIDORES DE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA**

**Douglas P. S. Gomes   Mário Oleskovicz (\*)   José C. M. Vieira Jr.   Fernando B. Bottura   José R. L. Filho**  
**USP – EESC            USP – EESC            USP – EESC            USP – EESC            Eletrobrás – EDPI**

(\*) Universidade de São Paulo – USP, Escola de Engenharia de São Carlos – EESC, Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação, Av. Trabalhador São-carlense, nº 400, CEP 13.566-590, São Carlos, SP – Brasil. Tel: (+5516) 3373-8142 – Fax: (+55 16) 3373-9372 – Email: olesk@sc.usp.br

## RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia de alocação estratégica e eficiente de monitores de qualidade da energia elétrica para viabilizar um adequado monitoramento dos Afundamentos de Tensão (ATs) em Sistemas de Distribuição (SDs). A metodologia propõe uma solução de alocação prática e direta, transpondo-se a necessidade de um processo de otimização específico. Um SD brasileiro de 89 nós, pertencente a uma concessionária de energia regional, foi modelado e utilizado para testes. Os resultados foram validados através do Método de Monte Carlo, revelando que de 93% a 100% dos ATs originários de curtos-circuitos considerados foram adequadamente monitorados.

## PALAVRAS-CHAVE

Qualidade da energia elétrica, afundamentos de tensão, sistemas de distribuição, monitoramento eficiente, Método de Monte Carlo.

### 1.0 - INTRODUÇÃO

Com base nas características dos sistemas elétricos atuais, principalmente frente à massiva inserção de cargas não lineares, vários esforços têm sido direcionados para minimizar os efeitos de uma má Qualidade da Energia Elétrica (QEE). Neste sentido um constante monitoramento da QEE mostra-se essencial para se tomar medidas corretivas e identificar as prováveis fontes dos distúrbios [1].

No cenário apresentado, o ideal seria então um completo monitoramento do Sistema Elétrico de Potência (SEP), o que em contrapartida se tornaria técnica e economicamente inviável devido às restrições práticas e econômicas. Alternativamente, somente alguns pontos específicos do SEP poderiam ser monitorados. Contudo, isto resultaria em outras dificuldades de análise que passam pela definição dos melhores locais para a instalação dos medidores. O número de equipamentos disponíveis, a configuração do sistema (extensão, ramais laterais, cargas instaladas, etc.), bem como a instalação e a manutenção dos equipamentos, e acesso às informações registradas são exemplos de importantes considerações. Além disso, a alocação inicial dos medidores dependerá dos objetivos e interesses do monitoramento, uma vez que a maioria dos eventos associados, por exemplo, aos Afundamentos de Tensão (ATs), apresenta uma natureza estocástica, exigindo, portanto, uma campanha de monitoramento por um período prolongado sobre o SEP em análise.

Da prática, sabe-se que a instalação de medidores de QEE nos Sistemas de Distribuição (SDs) está diretamente relacionada às reclamações dos consumidores. Ainda mais, como descrito em [2], os medidores são usualmente instalados pelos profissionais de acordo com a sua experiência e regras gerais, considerando o conhecimento sobre QEE e a topologia do SD. Alimentadores principais ou expressos, ou mesmo consumidores específicos (quando solicitado), são geralmente pontos de escolha para a instalação dos medidores.

Devido ao alto custo de aquisição e de manutenção dos equipamentos para o monitoramento, diferentes metodologias para a alocação ótima dos medidores com foco na QEE podem ser encontradas na literatura correlata. Pesquisas como [3] e [4] usam da teoria de grafos para caracterizar a conectividade entre as barras do SD para escolher a melhor alocação dos medidores. Ainda neste contexto, vários outros estudos também apresentam metodologias de otimização para a alocação de medidores sobre o SEP. Como por exemplo, as relacionadas ao monitoramento dos ATs [5-9], com foco na redundância das medidas [8,10,11] e na área cobertura do monitoramento [9].

Neste sentido, considerando que nem todos os profissionais atuantes na área de SEP têm experiência na aplicação de algoritmos inteligentes para resolver problemas de otimização, o presente trabalho apresenta uma solução para alocar medidores com o objetivo principal voltado ao monitoramento dos ATs de maneira direta e simplificada. Os pontos-chaves da pesquisa serão a redução do espaço de busca para a alocação dos medidores e certas adequações nos dados de entrada para o processo.

A avaliação da metodologia para o monitoramento dos ATs foi realizada em um sistema teste de distribuição do IEEE de 34 barras e em um sistema brasileiro de uma concessionária regional de 89 barras. Estes foram modelados através do *software* ATP (*Alternative Transients Program*) [12], via a interface gráfica do *software* ATPDraw [13].

Após uma avaliação inicial do desempenho do método proposto, os pontos de instalação dos medidores apontados foram validados pela aplicação do Método de Monte Carlo (MMC). Vale adiantar que a metodologia apresentada se mostrou eficiente frente às situações de falta que causaram os ATs nos sistemas testes analisados.

### 2.0 - MATRIZES DE OBSERVABILIDADE

O método de alocação proposto envolve o cálculo de duas matrizes de observabilidade: a Matriz de Tensão Durante a Falta (MTDF) e a Matriz Topológica de Cobertura (MTC). As duas matrizes serão empregadas para determinar o arranjo eficaz dos medidores de QEE a serem alocados nos SDs testes.

(\*) Universidade de São Paulo – USP, Escola de Engenharia de São Carlos – EESC, Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação, Av. Trabalhador São-carlense, nº 400, CEP 13.566-590, São Carlos, SP – Brasil. Tel: (+5516) 3373-8142 – Fax: (+55 16) 3373-9372 – Email: olesk@sc.usp.br

## 2.1 Matriz de Tensão Durante a Falta

Conforme apresentado por [14], a MTDF descreve o comportamento das tensões residuais (remanescentes) em todas as barras do sistema para uma determinada situação de curto-circuito aplicada, registrando informações sobre a robustez e sensibilidade dos nós (barras) do sistema elétrico frente aos possíveis ATs. Cada coluna desta matriz está associada a uma localização específica do curto-circuito aplicado, mostrando como o AT se propaga ao longo do alimentador analisado. Por outro lado, cada linha se refere às tensões observadas em um determinado nó quando os diversos nós do alimentador estudado estão sobre o efeito de um curto-circuito. A MTDF é uma matriz quadrada, cuja ordem é igual à quantidade de nós considerados na simulação e análise do SD monitorado.

Vale ressaltar que a MTDF é definida para um tipo de falta em específico. Alguns trabalhos consideram desde a aplicação exclusiva de faltas trifásicas francas [1], até todos os tipos de faltas [15]. Todavia, a alocação de medidores através de estudos de curtos-circuitos trifásicos francos pode não ser a maneira mais adequada de representar casos reais de ATs, uma vez que estes curtos-circuitos são mais severos e vão requerer menos sensibilidade do sistema de monitoramento. Já a simulação de todos os tipos de curtos-circuitos, envolvendo todas as variáveis possíveis, originará um considerável banco de dados e um demasiado esforço, tanto computacional, como dos especialistas.

Diante do exposto, para determinar o tipo de curto-circuito mais adequado à alocação dos medidores de QEE através da metodologia proposta, escolhem-se alguns pontos de interesse distintos ao longo do alimentador que se deseja monitorar. Os pontos devem ser escolhidos a depender do conhecimento e interesse do especialista sobre o sistema em análise. Nos pontos escolhidos serão aplicados todos os tipos de curtos-circuitos (monofásicos, bifásicos e trifásicos, com ou sem o envolvimento da terra). Em seguida, para cada um dos tipos de curtos-circuitos mencionados, realiza-se uma análise da tensão residual em todos os nós do SD, adotando-se o tipo de curto-circuito menos severo, ou seja, aquele que provocou ATs mais amenos, para o cálculo da MTDF.

Em relação à escolha da resistência de falta utilizada nos curtos-circuitos, um critério análogo à escolha do tipo de curto-circuito é adotado. Para tanto, o maior valor possível de resistência de falta capaz de provocar ATs nos nós do alimentador monitorado deve ser considerado. Sendo assim, uma vez garantido o monitoramento para altas resistências de falta, espera-se conservar o monitoramento quando resistências de falta menores forem evidenciadas na prática. Nesta pesquisa, o estudo para a determinação das resistências de faltas foi conduzido para valores de 0 até 50  $\Omega$ .

É importante ressaltar que os critérios anteriormente adotados visam garantir primariamente a observabilidade para os ATs com menor tensão remanescente, e, por consequência, espera-se que a observabilidade para os ATs com maior tensão residual também seja garantida.

## 2.2 Matriz Topolócica de Cobertura (MTC)

A MTC é a segunda matriz de observabilidade a ser calculada, e resultará da Matriz de Cobertura (MC). Esta matriz é utilizada para delimitar a área de cobertura dos medidores instalados. Por definição é uma matriz binária, na qual o valor unitário da entrada  $(j, k)$  indica que o ponto  $k$  é monitorado (ou coberto) pelo medidor de QEE instalado no nó  $j$ , e o valor nulo indica o não monitoramento (ou não cobertura) do ponto  $k$  pelo medidor instalado em  $j$ . A atribuição dos valores binários às entradas da matriz MC é efetuada a partir da comparação entre os valores das tensões remanescentes registrados na MTDF e o limiar de tensão pré-definido ( $\alpha$ ), conforme expresso pela equação (1) [16]. Para os ATs o limiar  $\alpha$  poderá ser escolhido entre 0,1 a 0,9 p.u..

$$MC_{(j,k)} = \begin{cases} 1, & \text{se } MTDF_{(k,f)} \leq \alpha \text{ p.u.}, \text{ para ao menos uma das fases} \\ 0, & \text{se } MTDF_{(k,f)} > \alpha \text{ p.u.}, \text{ para ao menos uma das fases} \end{cases} \quad (1)$$

O valor usualmente utilizado é o de  $\alpha = 0,9$  p.u., principalmente por ser o limiar superior de definição de um AT [17]. Caso um limiar de tensão menor do que 0,9 p.u. seja escolhido, um número menor de entradas unitárias será esperado, e, portanto, uma menor área de cobertura será delimitada (MC mais esparsa). Uma menor área de cobertura implica, contudo, em um maior número de medidores para observar o sistema como um todo.

Vale destacar que a redução de  $\alpha$  possibilita a descoberta de bons locais para a instalação de medidores excedentes, ou seja, quando a concessionária dispõe de um maior recurso destinado à aquisição de medidores de QEE e almeja um aumento da redundância das medidas.

Sendo assim, a MC já contém informações sobre quais nós serão sensibilizados pelo tipo de curto-circuito analisado para diversos locais de aplicação. Através desta matriz, é possível obter informações sobre esquemas de alocação para monitorar os ATs. No entanto, quando utilizada em sistemas de distribuição radiais, essa matriz deixa de ser a mais adequada, já que os nós que se situam no fim dos alimentadores serão os mais afetados pelos curtos-circuitos, e assim, a alocação se limitará a tais pontos.

Uma adequação frente à formulação dos dados de entrada (MTDF e MC) é então sugerida. Baseado em [16], a adequação proposta é uma restrição que não permite que os ATs causados por faltas a montante do equipamento, inicialmente alocado pela MC, sejam monitoradas pelo mesmo. Assim, respeitando esta restrição, os medidores

(\*) Universidade de São Paulo – USP, Escola de Engenharia de São Carlos – EESC, Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação, Av. Trabalhador São-carlense, nº 400, CEP 13.566-590, São Carlos, SP – Brasil. Tel: (+5516) 3373-8142 – Fax: (+55 16) 3373-9372 – Email: olesk@sc.usp.br

somente observarão os curtos-circuitos que causem ATs em pontos à jusante do seu local de instalação em um sistema radial. A matriz que considera essa restrição foi nomeada de Matriz Topológica de Cobertura (MTC).

A criação da MTC com esta sugestão pode ser dada por (3), na qual os casos de restrição topológica serão verdadeiros toda vez que o nó  $k$  a ser observado estiver a montante do nó  $j$ . Assim, mesmo que este seja sensibilizado por uma falta em  $k$ , seu elemento na matriz deve ser igual à zero.

$$MTC_{(j,k)} = \begin{cases} 1, & \text{se } MTDf_{(k,f)} \leq \alpha \text{ p.u. para ao menos uma das fases} \\ 0, & \text{se há um caso de restrição topológica} \\ 0, & \text{se } MTDf_{(k,f)} > \alpha \text{ p.u. em qualquer fase} \end{cases} \quad (3)$$

### 3.0 - A METODOLOGIA DE ALOCAÇÃO ADOTADA

O processo de alocação dos medidores de QEE é descrito por três etapas básicas e consiste no processamento das informações contidas na MTDf e na MTC. Relembra-se que a MTDf será originada a partir da análise dos curtos-circuitos simulados sobre o SD em análise, conforme comentado anteriormente no item 2.1

#### 3.1 Etapa 1

A primeira etapa é responsável por fazer o somatório dos elementos de cada coluna  $k$  e cada linha  $j$  da MTC, obtida a partir da MTDf. O resultado do somatório dos elementos das  $j$ -ésimas linhas da MTC determinará a quantidade de nós que podem ser monitorados a partir de um medidor de QEE instalado no nó  $j$  do SD em análise. Já o resultado do somatório das  $k$ -ésimas colunas determinará quantos nós do SD sofrerão ATs, devido à aplicação de um curto-circuito no nó  $k$  do sistema. Vale lembrar que a MTC possui ordem  $j \times k$ , sendo  $j$  e  $k$  ambos iguais à quantidade de nós presentes no SD.

#### 3.2 Etapa 2

A segunda etapa está relacionada à instalação de medidores em nós cuja alocação é obrigatória para garantir o total monitoramento dos ATs a que o SD possa estar submetido. A identificação desses nós é feita novamente pelo resultado do somatório das  $k$ -ésimas colunas. Se o resultado do somatório da coluna  $k$  for igual a 1, significa que um medidor de QEE deve ser instalado no nó  $k$ . A instalação obrigatória neste nó é justificada uma vez que os ATs, provocados pela incidência de um curto-circuito no próprio nó  $k$ , não se propagam para o restante da rede, isto é, nenhum outro ponto do SD sofrerá ATs em função de um curto-circuito presente no nó  $k$ , com exceção do próprio nó  $k$ .

Após a identificação de todos os possíveis nós de instalação obrigatória, as colunas da MTC referentes aos nós de instalação obrigatória são excluídas da MTC. Este procedimento reduzirá a dimensão do espaço de busca para a identificação dos demais pontos de alocação dos medidores de QEE.

#### 3.3 Etapa 3

##### 3.3.1 Passo 1

Na terceira etapa o objetivo consiste em encontrar os nós a partir dos quais um medidor de QEE instalado possa monitorar a maior quantidade de pontos no sistema, maximizando assim a eficiência de cada medidor instalado. Para tanto, identifica-se a linha da MTC (após seu redimensionamento feito na Etapa 2) cujo resultado do somatório de seus elementos é o maior. A linha  $k = k_{m\acute{a}x}$  com o maior resultado da somatória será então, o próximo local de instalação do MQEE.

##### 3.3.2 Passo 2

Em seguida, um novo redimensionamento da MTC é realizado. Desta vez, para cada elemento da linha  $k = k_{m\acute{a}x}$ , cujo valor é unitário, deve-se eliminar a respectiva coluna. Em outras palavras, eliminam-se todas as colunas da linha  $k = k_{m\acute{a}x}$  que contenham valor 1.

Os passos 1 e 2, devem ser repetidos até que todas as colunas da MTC sejam eliminadas. A cada iteração compreendendo os Passos 1 e 2, um novo local de instalação do medidor de QEE será apontado. Ao final das iterações da etapa 3 a disposição final dos medidores é obtida.

## 4.0 - SISTEMAS ELÉTRICOS UTILIZADOS

### 4.1 Sistemas teste de 34 nós do IEEE

O sistema de 34 nós do IEEE é baseado em um alimentador 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 maior trecho do tronco principal chega a 57,6 km com 2,05 MVA de carregamento); dois reguladores de tensão requeridos para manter um bom perfil de tensão; um transformador abaixador para 4,16 kV, situado entre os nós #832 e #888; cargas desbalanceadas concentradas e distribuídas; e banco de capacitores *shunt* (em derivação).

(\*) Universidade de São Paulo – USP, Escola de Engenharia de São Carlos – EESC, Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação, Av. Trabalhador São-carlense, nº 400, CEP 13.566-590, São Carlos, SP – Brasil. Tel: (+5516) 3373-8142 – Fax: (+55 16) 3373-9372 – Email: olesk@sc.usp.br

A Figura 1 ilustra o diagrama unifilar, fora de escala, do sistema descrito.

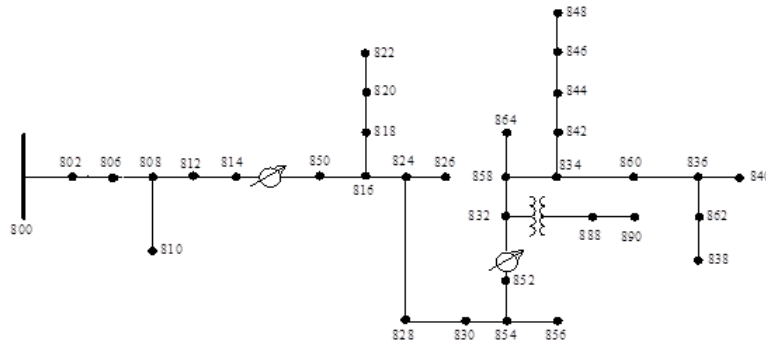


Figura 1 - Diagrama unifilar do sistema de 34 nós

#### 4.2 Sistema real regional de 89 nós

Com o intuito de uma validação prática à metodologia proposta, um sistema real que supre cargas industriais foi utilizado a fim de testar os passos adotados. O SD em questão é referente a um alimentador utilizado no projeto de pesquisa e desenvolvimento PD-0042/2014-ANEEL (Eletrobrás Distribuição Piauí).

Os dados para a modelagem do SD foram fornecidos pela distribuidora responsável, Eletrobrás Distribuição Piauí, situada no estado do Piauí. Entregues em formatos de tabelas com as informações sobre as características de suas linhas, comprimento dos trechos, equipamentos e potências dos transformadores, a modelagem e simulação do sistema foi realizada de maneira similar ao sistema de 34 nós. Com caráter ilustrativo, a Figura 2 mostra o diagrama unifilar do SD real analisado.

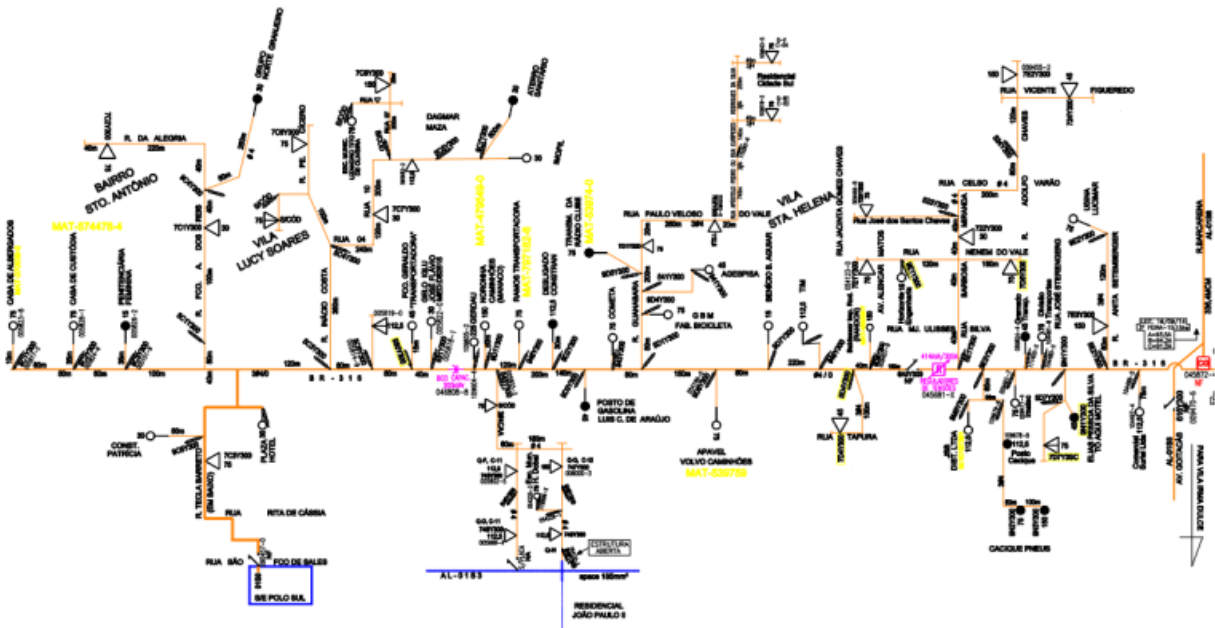


Figura 2 - Diagrama unifilar do SD real analisado

### 5.0 - RESULTADOS

A fim de melhor ilustrar os resultados, os mesmos serão descritos separadamente para cada sistema teste. Para cada caso serão evidenciados pontos relevantes sobre a metodologia de alocação aplicada.

#### 5.1 Resposta da alocação no sistema de 34 nós

Para a construção da MTC deste sistema, conforme apresentado no item 2.1, o tipo de falta escolhido para a execução do método de alocação foi o monofásico-terra (fase B – terra), com a máxima resistência de falta de 50  $\Omega$  para a maioria dos nós, exceto para os dois mais próximos da subestação, nos quais o valor estipulado foi de 40  $\Omega$ . Em função da tensão nominal do SD, um alto valor de resistência de falta pôde ser utilizado e seu monitoramento frente aos ATs foi facilmente garantido.

A Figura 3 ilustra a instalação dos medidores (equipamentos representados por um círculo azul) no sistema de 34 nós. A diferença na apresentação da Figura 3 para a apresentada anteriormente (Figura 1) é dada pela representação das distâncias entre os nós, pois agora estas estão em uma escala representativa das distâncias

(\*) Universidade de São Paulo – USP, Escola de Engenharia de São Carlos – EESC, Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação, Av. Trabalhador São-carlense, nº 400, CEP 13.566-590, São Carlos, SP – Brasil. Tel: (+5516) 3373-8142 – Fax: (+55 16) 3373-9372 – Email: olesk@sc.usp.br

reais entre os pontos de alocação escolhidos.

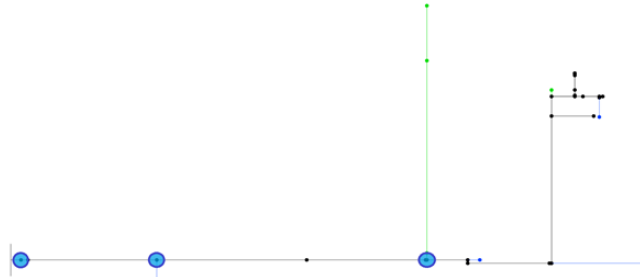


Figura 3 - Alocação dos medidores de QEE no sistema de 34 nós dado um limiar de 0,9 p.u.

Como anteriormente comentado, a redução de  $\alpha$  possibilita a descoberta de bons locais para a instalação de medidores excedentes, ou seja, quando a concessionária dispõe de um maior recurso destinado à aquisição de medidores de QEE e um aumento da redundância das medidas é almejado. Neste sentido, o limiar de construção da MTC foi alterado para 0,7 p.u., 0,6 p.u. e 0,5 p.u. No tocante ao limiar de 0,8 p.u., este não será comentado, pois não houve mudanças significativas na alocação em comparação ao que foi apresentado para o limiar de 0,9 p.u..

Vale lembrar que pela restrição topológica considerada nesta pesquisa, os nós em análise podem ser monitorados somente por pontos a montante na topologia do alimentador. Sendo assim, para a garantia da observação de todos os nós por pelo menos um monitor, o primeiro nó do sistema a ser considerado na alocação sempre terá um monitor instalado por padrão.

Os resultados das respostas para os esquemas de alocação estão descritos resumidamente na Tabela 1. A primeira coluna indica o limiar, ou a faixa de limiares considerada. Já a segunda, apresenta a resposta da metodologia indicando a quantidade de medidores que devem ser instalados. A terceira coluna mostra a posição de instalação de cada medidor, e a última coluna representa o desempenho dos esquemas de alocação considerados frente às simulações pelo Método de Monte Carlo (MMC) [18]. O valor percentual representa a totalidade dos medidores alocados que foram sensibilizados pelas 1.000 situações de curtos-circuitos considerados pelo MMC e simuladas via o *software* ATP.

Tabela 1 - Alocação de medidores de QEE para o sistema de 34 nós.

Limiares	Quantidade de monitores	Posição dos monitores (barras)	% de medidores sensibilizados via o MMC
0,9 p.u.	3	#1, #3 e #7	100%
0,9-0,7 p.u.	4	#1, #3, #5 e #7	100%
0,9-0,6 p.u.	6	#1, #3, #5, #6, #9 e #14	100%
0,9-0,5 p.u.	8	#1, #3, #5, #6, #9, #14, #15 e #27	100%

## 5.2 Resposta para alocação no sistema real (89 nós)

Para a construção da MTC do sistema real simulado, o tipo de falta escolhido para a execução do método também foi o monofásico-terra (fase A - terra), com máximo valor de resistência de falta possível. Sendo assim, valores entre 0 e 50  $\Omega$  foram determinados para cada nó. Por contemplar uma tensão nominal de 13,8 kV, altos valores de resistência de falta em alguns casos não geraram situações de ATs.

A Fig. 4 ilustra o esquema de instalação dos monitores, para um limiar de 0,9 p.u. no sistema real (89 nós). A diferença observada na representação entre as Figuras 2 e 4 é que, nesta última, tem-se uma escala representativa mais próxima a real.

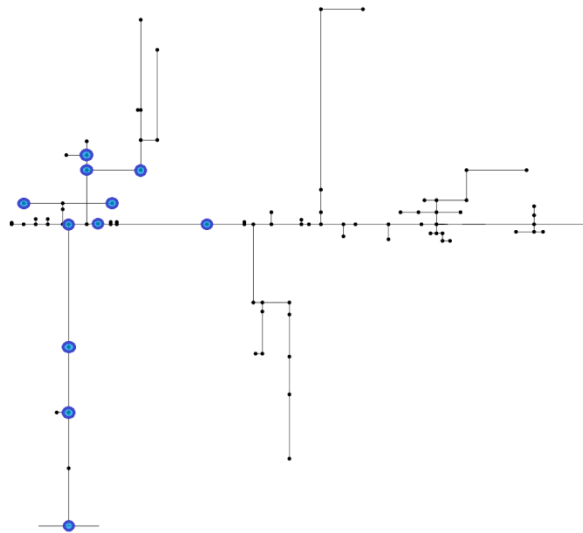


Figura 4 - Alocação dos medidores de QEE no sistema de distribuição real para um limiar de 0,9 p.u.

Por ser demasiadamente sensível à escolha do tipo e resistência da falta, o método pode ser influenciado de maneira negativa, colocando um número relativamente alto de medidores em relação à intenção de investimento inicial da concessionária. Sabendo que pode existir a necessidade e intenção de um investimento inicial menor ao sistema de monitoramento, a metodologia proposta também considera a possibilidade da redução da quantidade inicial medidores, mantendo a qualidade do monitoramento. O artifício consiste em diminuir a resistência de falta considerada em alguns nós do SD. A influência desse passo adotado sobre a eficiência do monitoramento será validado pelas simulações caracterizadas pelo MMC.

As Fig. 5 e 6 ilustram a alocação dos medidores quando a resistência de falta considerada foi de 5 e de 10  $\Omega$ , respectivamente. A Tabela 2 apresenta de maneira resumida os resultados da alocação no sistema real, assim como o desempenho geral do método proposto.

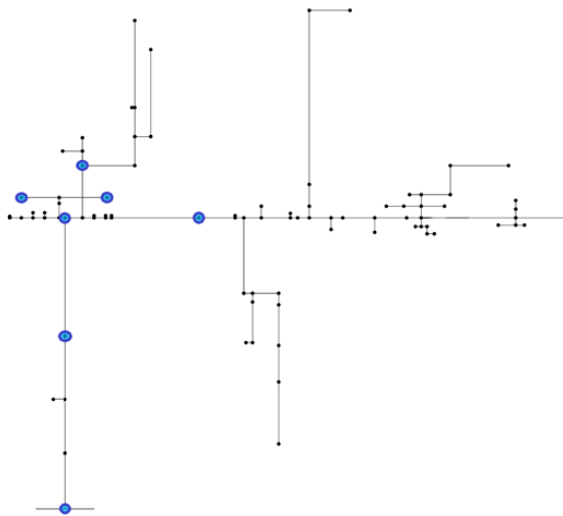


Figura 5 - Alocação dos medidores de QEE no sistema de distribuição real para a MTC com resistências de falta diminuídas em 5  $\Omega$

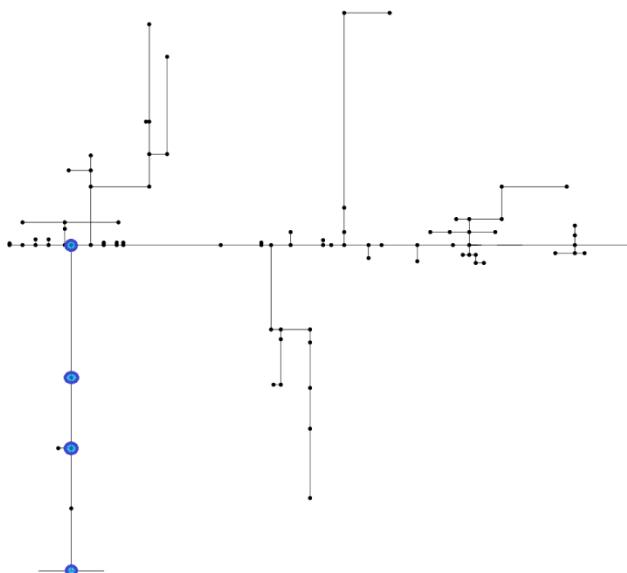


Figura 6 - Alocação dos medidores de QEE no sistema de distribuição real para a MTC com resistências de falta diminuídas em  $10 \Omega$

Tabela 2 - Alocação dos medidores para o sistema real

Limiares	Quantidade de monitores	Posição dos monitores (barras)	% de medidores sensibilizados via o MMC
0,9 p.u.	11	#1, #3, #5, #6, #17, #18, #20, #21, #24, #31 e #37	100%
0,9 p.u. (-5 ohms)	7	#1, #5, #6, #17, #18, #20 e #37	100%
0,9 p.u. (-10 ohms)	4	#1, #3, #5 e #6	93%

Mais uma vez, o método proposto conseguiu apresentar respostas satisfatórias para o limiar de 0,9 p.u., mesmo com a diminuição da resistência de falta para  $5 \Omega$ . No entanto, vale frisar que ao utilizar o artifício para diminuir a quantidade de medidores, o método pode perder eficiência no monitoramento, fato que pode ser observado pela última linha da Tabela 2. Mas, ainda assim, percebe-se que a diminuição do valor da resistência de falta em  $10 \Omega$  alterou pouco a eficiência do sistema de monitoramento. Isso leva a conclusão de que a instalação de apenas alguns medidores já garante boa parte da observação dos ATs passíveis de ocorrência.

Coloca-se que maiores detalhes sobre método implementado e apresentado podem ser encontrados em [19].

## 6.0 - CONCLUSÕES

Na aplicação da metodologia proposta, sugestões para modificações na construção dos dados de entrada (MTDF e MTC) foram implementadas, com o intuito de contribuir para a alocação e instalação dos medidores direta e facilitada em sistemas de distribuição para monitorar ATs. O método apresentado se mostrou útil, sendo validado através do Método Monte Carlo. Contudo, ainda falta ao presente trabalho realizar uma inferência sobre as limitações do método quando sistemas maiores forem analisados, ou quando diferentes topologias forem consideradas, fazendo necessário futuras investigações em sua aplicação.

## 7.0 - AGRADECIMENTOS

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 ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e à Eletrobrás Distribuição Piauí - EDPI (PD-0042/2014-ANEEL) pelo suporte financeiro disponibilizado em partes distintas da realização desta pesquisa.

## 8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS


- [1] A. A., Ibrahim; A., Mohamed; H., Shareef; S. P., Ghoshal. Optimal placement of voltage sag monitors based on monitor reach area and sag severity index. Research and Development (SCOREd), IEEE Student Conference, Putrajaya, 13-14 Dez. de 2010, p. 467 - 470.
- [2] Dong-Jun Won, and Seung-II Moon. "Optimal number and locations of power quality monitors considering system topology." *Power Delivery, IEEE Transactions on* 23.1 (2008): 288-295.

(\*) Universidade de São Paulo – USP, Escola de Engenharia de São Carlos – EESC, Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação, Av. Trabalhador São-carlense, nº 400, CEP 13.566-590, São Carlos, SP – Brasil. Tel: (+5516) 3373-8142 – Fax: (+55 16) 3373-9372 – Email: olesk@sc.usp.br



- [3] Dong-Jun Won, et al. "A new algorithm to locate power-quality event source with improved realization of distributed monitoring scheme." *Power Delivery, IEEE Transactions on* 21.3 (2006): 1641-1647.
- [4] I. Y. Chung, et al. "Development of a network-based power quality diagnosis system." *ELSEVIER Electric Power Systems Research*, 77 (2007): 1086-1094.
- [5] E. Espinosa-Juarez, A. Hernandez, and G. Olguin. "An approach based on analytical expressions for optimal location of voltage sags monitors." *Power Delivery, IEEE Transactions on* 24.4 (2009): 2034-2042.
- [6] T. R. Kempner, et al. "Optimal voltage sags monitoring considering different loading profiles in distribution systems." *Renewable Energy and Power Quality Journal (RE&PQJ)*, ISSN 2172-038 X, No.14 (2016).
- [7] D. P. S. Gomes et al. "A generalized coverage matrix method for power quality monitor allocation utilizing genetic algorithm". *Renewable Energy and Power Quality Journal (RE&PQJ)*, ISSN 2172-038 X, No.14 (2016).
- [8] A. Kazemi et al. "Optimal power quality monitor placement using genetic algorithm and Mallow's Cp". *Electrical Power and Energy Systems* 53 (2013): 564–575.
- [9] A. A. Ibrahim, A. Mohamed, and H. Shareef, "Optimal power quality monitor placement in power systems using an adaptive quantum-inspired binary gravitational search algorithm". *Electrical Power and Energy Systems* 57 (2014): 404–413.
- [10] F. Salim, and K. M. Nor. "Optimal voltage sag monitor locations." *Power Engineering Conference, 2008. AUPEC'08. Australasian Universities*. IEEE, 2008.
- [11] F. Salim, and K. M. Nor. "Voltage sags observation through optimal monitor locations." *Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2010 14th International Conference on*. IEEE, 2010.
- [12] KIZILCAY, M. Alternative Transients Program. EMTP, 2015. Disponível em: <<http://www.emtp.org/>>. Acesso em: Fev. de 2016.
- [13] HØIDALEN, H. K. ATPDraw - The graphical preprocessor do ATP Electromagnetic Transients Program. ATPDraw, 2012. Disponível em: <<http://www.atpdraw.net/>>. Acesso em: Fev. de 2016
- [14] G., Olguin; M. H. J., Bollen. Optimal dips monitoring program for characterization of transmission system. Proceedings of IEEE/PES General Meeting, Jul. de 2003, p. 13-17.
- [15] 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, Curitiba, 8-12 Nov. de 2009, p. 1 – 6.
- [16] A. A., Ibrahim; A., Mohamed; H., Mohamed; S. P., Ghoshal. Optimal power quality monitor placement in power systems based on particle swarm optimization and artificial immune system. Data Mining and Optimization (DMO). IEEE., Putrajaya, 28-29 Jun. de 2011, p. 141-145.
- [17] V., Matz; T., Radil; P., Ramos; A.C., Serra. Automated Power Quality Monitoring System for on-line detection and classification of disturbances. Instrumental and Measurement Technology Conference (IMTC), Warsaw, Poland, 1-3 Mai. de 2007.
- [18] R. Eckhardt, S. Ulam, and J. von Neumann, The Monte Carlo Method. Los Alamos Science Special Issue, Los Alamos, n. 15, p. 131-137, 1987.
- [19] Gomes, D. P. S. Metodologia e Simplificação do Espaço de Busca para a Alocação de Medidores de Qualidade da Energia Elétrica frente às Variações de Tensão de Curta Duração. 2016. 140 p. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

## 9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

	<p><b>Douglas P. S. Gomes</b> (M.Sc. 2016): Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Mato Grosso - UFMT (2013), obtendo o título de mestre em Engenharia Elétrica pela Escola de Engenharia de São Carlos - EESC, Universidade de São Paulo - USP, em 2016. Atualmente é estudante no programa de Ph.D. pela Victoria University em Melbourne – Australia. Pesquisa na área de detecção de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição. Tem artigos na área de sistema de potência sobre alocação otimizada de monitores, simulação computacional de sistemas de energia elétrica e eficiência energética.</p>
---	--

	<p><b><u>Mário Oleskovicz</u></b> (<i>D.Sc. 2001, Professor Associado (MS-5.1), Pesq. 1-D CNPq</i>): Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC (1995), obtendo os títulos de mestre e de doutor em Engenharia Elétrica pela Escola de Engenharia de São Carlos - EESC, Universidade de São Paulo - USP, em 1997 e 2001, respectivamente. Atualmente é Professor Associado na Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica (Sistemas Elétricos de Potência), com ênfase nas subáreas de proteção digital de sistemas elétricos de potência e qualidade da energia elétrica.</p>
	<p><b><u>José Carlos de Melo Vieira Jr.</u></b> (<i>D.Sc. 2006, Professor Associado (MS-5.1), Pesq. 2 CNPq</i>): Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (1996). Obteve os títulos de mestre e de doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas em 1999 e 2006, respectivamente. Realizou estágio de pós-doutorado em 2011 na Universidade de Alberta (Canadá). Atualmente é Professor Associado na Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Suas principais áreas de interesse em pesquisa são redes inteligentes, sistemas de distribuição de energia elétrica e geração distribuída.</p>
	<p><b><u>Fernando Bambozzi Bottura</u></b> (<i>M. Sc, 2014</i>) Possui graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação pela Escola de Engenharia de São Carlos – EESC, Universidade de São Paulo – USP, (2010), obtendo o título de mestre em Engenharia Elétrica pela mesma instituição (2014). Atualmente está matriculado no programa de Doutorado em Engenharia Elétrica pela EESC, USP e é bolsista de mobilidade acadêmica na Université Paris-Saclay – CentraleSupélec, França, no âmbito do programa ERASMUS-SMART2 European Commission. Sua área de pesquisa atual inclui o monitoramento da qualidade da energia elétrica em sistemas de distribuição. Possui experiência também na área de proteção de sistemas elétricos de potência e sistemas inteligentes aplicados aos sistemas elétricos de potência.</p>
	<p><b><u>Eng. José Ribamar Lima Filho</u></b>, Gerente de Pesquisa/Desenvolvimento e Eficiência Energética – DRRD, Eletrobrás Distribuição PiauÍ – EDPI. A biografia do Eng. José de Ribamar Lima Filho será fornecida posteriormente.</p>