

# Determinação de Sistema de Monitoração de VTCDs em Redes de Transmissão

C. F. M. Almeida e N. Kagan

**Resumo** -- Este artigo apresenta uma metodologia baseada em Algoritmos Genéticos e Teoria dos Conjuntos Fuzzy que determina o número ótimo de medidores de Qualidade de Energia, bem como os pontos onde os mesmos devem ser instalados para monitorar Afundamentos e Elevações de Tensão em redes de transmissão de energia elétrica. Sendo assim, a mesma representa uma ferramenta para diversas áreas de uma empresa de energia elétrica, porque ela indica a melhor configuração de um sistema de medição a ser implantado em um sistema de potência, considerando as restrições econômicas e operacionais. A fim de validar o modelo proposto, neste artigo, três redes elétricas são avaliadas para determinar o número mínimo de medidores de Qualidade de Energia, bem como a localização onde esses equipamentos deveriam ser instalados. Os níveis de Redundância e de Observabilidade são apresentados, bem como as formulações usadas para atingir os resultados apresentados.

**Palavras-chave** – Afundamentos de Tensão, Algoritmos Genéticos, Alocação Ótima de Medidores, Distribuição de Energia Elétrica, Sistemas de Potência, Qualidade de Energia, Monitoração de Sistemas de Potência, Transmissão de Energia Elétrica, Lógica Fuzzy, Elevações de Tensão.

## I. INTRODUÇÃO

O presente artigo ilustra uma série de definições que apoiam a elaboração de uma metodologia que oriente a determinação dos locais de instalação de medidores de QEE (Qualidade de Energia Elétrica) em um sistema elétrico de potência qualquer.

A principal contribuição do trabalho foi o estabelecimento de conceitos pelos quais os sistemas de potência pudessem ser avaliados, de modo a orientar o dimensionamento de sistemas de medição capazes de monitorar a ocorrência de VTCDs (Variações de Tensão de Curta Duração), e de permitir a caracterização das redes elétricas frente a este fenômeno.

As VTCDs estão entre as perturbações mais difíceis de serem monitoradas, pois são ocasionadas por fatores aleatórios e imprevisíveis, ou seja, a dificuldade não está só em medir a magnitude e a duração que as caracterizam, mas em determinar a frequência de ocorrência e o instante de início das mesmas. Sendo assim, a literatura atual sugere que seja feita a instalação de instrumentos de medição dedicados em todos os pontos do sistema de potência em que se deseja monitorar a ocorrência das VTCDs ([02], [03], [04] e [05]). O inconveniente desse método é a quantidade de equipamentos necessários, uma vez que medições locais em múltiplos pontos fazem com que a avaliação seja uma atividade bastante onerosa, devido à quantidade de equipamentos necessários

para a detecção das perturbações, e ao tratamento do elevado volume de dados registrados, inviabilizando, por muitas vezes, o próprio sistema de monitoração. Além disso, há dificuldades inerentes ao próprio SEP (Sistema Elétrico de Potência) que inviabilizam a instalações dos instrumentos de medição em qualquer ponto, como:

- condições de infra-estrutura local, com relação à comunicação e operação do sistema;
- inexistência de transformadores de medidas nas três fases;
- o fato de muitos pontos corresponderem a instalações de terceiros (consumidores do Grupo A).

Com a reestruturação do setor elétrico, a preocupação com penalizações advindas das infrações aos limites regulatórios, bem como o aumento da competitividade, acentuaram a necessidade de se implementar um sistema de monitoração permanente, pois a energia elétrica passou a ser encarada como um produto, que deveria ser visto não só sob a ótica da continuidade, mas, também, da conformidade. Ou seja, empresas capazes de fornecer energia com maior qualidade a um custo menor, têm mais condições, sobre as demais, de se destacar no mercado, principalmente entre os consumidores que necessitam de energia elétrica livre de perturbações.

Nesse contexto, uma metodologia que determine o número mínimo de medidores de Qualidade de Energia necessários para monitorar uma rede elétrica, bem como os pontos onde os mesmos devam ser instalados, torna-se uma alternativa atraente para as concessionárias de energia dimensionar os sistemas de medição necessários para monitorar as suas redes.

A alocação ótima de medidores de QEE determina as posições em que os mesmos devem ser instalados, de modo que a área de monitoração sobre um sistema de potência qualquer seja maximizada. Ou seja, dado um medidor, este deve ser instalado em um ponto do sistema de potência em avaliação de modo que ele seja capaz de “observar” o maior número possível de ocorrências que provocam variações de tensão no sistema possa vir a ser submetido.

A utilização de AGs (Algoritmos Genéticos) e da Teoria de Conjuntos Fuzzy fornece flexibilidade suficiente para atender diferentes objetivos (maximização da Observabilidade, minimização do número de equipamentos, minimização do custo de instalação), bem como diferentes restrições (pontos de instalação permitidos, cargas com monitoração obrigatória), a que o problema em questão pode ser submetido, no caso da avaliação de redes elétricas reais.

A metodologia desenvolvida neste trabalho engloba a simulações de ocorrência de VTCDs, devido aos diversos tipos possíveis de curtos-circuitos em diferentes pontos das redes elétricas (tanto nas barras, quanto ao longo das linhas

que as compõem), de forma que se permita caracterizar o comportamento do sistema elétrico frente a esse fenômeno. Essa caracterização dos sistemas elétricos frente à ocorrência de VTCDs considera as características topológicas das redes elétricas, viabilizando a verificação da influência de cada defeito no próprio sistema em avaliação. Assim, possibilita-se a determinação dos pontos em que se deve instalar um medidor para que a área do sistema “observada” pelo mesmo seja a maior possível.

## II. DEFINIÇÕES E MODELAGEM

A metodologia apresentada neste artigo preocupa-se em determinar as posições em que medidores de Qualidade de Energia Elétrica devem ser instalados, de forma a maximizar a capacidade de monitoração de VTCDs sobre um SEP. Sendo assim, foi necessário o estabelecimento de algumas definições que:

- Viabilizassem o equacionamento do problema dentro dos métodos de obtenção de solução utilizados;
- Permitissem ilustrar as soluções encontradas, bem como o resultado da avaliação das soluções.

### A. Vetor-Alocação

Trata-se justamente da resposta ao problema da Alocação Ótima de Medidores de QEE. É ele que vai indicar o número de medidores necessários para monitorar um SEP (Sistema Elétrico de Potência), bem como em quais pontos (barras) do SEP devem ser instalados os equipamentos de medição.

A sua configuração é, então, justificada pelo fato do problema abordado neste artigo se tratar de um problema de decisão dupla, no qual a solução deve satisfazer duas variáveis simultaneamente:

- Uma referente à decisão sobre a instalação, ou não, de um medidor;
- E outra referente à decisão da posição (barra) do SEP em avaliação que um medidor deve ser instalado.

Sendo assim, o Vetor-Alocação foi definido de duas formas distintas, de modo a averiguar qual alternativa mais eficiente para a modelagem da solução para o problema.

#### 1) Vetor-Alocação Binário

Esse vetor é formado por 0's e 1's, e a sua dimensão varia com o número de barras do sistema em avaliação, já que cada coordenada do mesmo representa a instalação do medidor em uma barra determinada. A expressão (1), que segue, ilustra a definição do Vetor-Alocação Binário ( $V_{Aloc}$ ):

$$V_{Aloc}(i) = \begin{cases} 1, & \text{para a instalação de medidor na barra } i; \\ 0, & \text{para a não-instalação de medidor na barra } i. \end{cases} \quad [1]$$

#### 2) Vetor-Alocação Inteiro

Neste vetor, a decisão pela instalação de um medidor em uma determinada barra foi feita através do preenchimento de cada uma das coordenadas do vetor com o número de uma barra do SEP em avaliação. Isto é, apenas as barras com os números descritos nas coordenadas no Vetor-Alocação deveriam ser consideradas para a instalação de medidores de QEE. Essa mudança fez com que a possibilidade de cada uma das barras terem medidor de QEE fosse diminuída

consideravelmente; pois, na determinação de cada coordenada do vetor, todas as barras do sistema concorreriam igualmente.

A expressão [2], que segue, ilustra a definição do Vetor-Alocação Inteiro ( $V_{Aloc}$ ):

$$V_{Aloc}(i) = n; \text{ para instalação do medidor } i \text{ na barra } n \text{ o,} \\ \text{sendo que } n \text{ pode variar de 0 ao número de} \quad [2] \\ \text{barras do SEP em avaliação}$$

### B. Matriz de Observabilidade

Para mapear o desempenho de um SEP qualquer frente às possíveis ocorrências de VTCDs no mesmo, foi definida uma matriz com os valores das tensões de falta em cada uma das barras, para cada defeito simulado. Essa matriz foi definida considerando que cada linha representaria a posição de defeito, isto é, uma barra ou um ponto no meio de uma linha do SEP em avaliação em que foi simulado um determinado tipo de curto-circuito; e que, em cada coluna, seriam armazenados os valores das tensões de falta de cada barra.

A fim de simplificar e tornar a avaliação mais objetiva, a partir dessa matriz definiu-se a Matriz de Observabilidade, que é obtida fixando-se o valor da magnitude das tensões de falta, a partir do qual se deseja que os medidores sejam sensibilizados (Nível de Disparo -  $n_d$  - dos medidores).

Assim, para o caso de avaliação de Afundamentos de Tensão, fixando-se adequadamente o Nível de Disparo desejado (sendo que  $n_d \in [0,1pu; 0,9pu]$ , de acordo com a referência [01]), as posições da matriz são preenchidas com 0 (zero), caso o valor da tensão de falta seja superior ao Nível de Disparo fixado, e com 1 (um), caso contrário. Já para a avaliação de Elevações de Tensão, fixando-se adequadamente o Nível de Disparo desejado (sendo que  $n_d \in [1,1pu; \infty)$ , de acordo com a referência [01]), as posições da matriz são preenchidas com 0 (zero), caso o valor da tensão de falta seja inferior ao Nível de Disparo fixado, e com 1 (um), caso contrário.

A expressão [3] ilustra o procedimento descrito para montagem da Matriz de Observabilidade (MO), para o caso da avaliação de Afundamentos de Tensão.

$$MO_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{quando defeito } i \text{ faz com que tensão de falta na} \\ & \text{barra } j \text{ for igual ou abaixo do } \mathbf{Nível de Disparo} \\ & \text{fixado } (0,1 < v_{ij} \leq n_d) \\ 0, & \text{quando defeito } i \text{ faz com que tensão de falta} \\ & \text{na barra } j \text{ não fique abaixo do } \mathbf{Nível de} \\ & \mathbf{Disparo} \text{ fixado } (v_{ij} > n_d) \end{cases} \quad [3]$$

Onde:

- $v_{ij}$ : é o elemento da linha  $i$ , coluna  $j$  da matriz de tensões  $V$ . Analogamente, para a avaliação de Elevações de Tensão, o procedimento para a montagem da MO correspondente é descrito na expressão [4].

$$MO_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{quando defeito } i \text{ faz com que tensão de falta} \\ & \text{na barra } j \text{ for abaixo do } \mathbf{Nível de Disparo} \\ & \text{fixado } (v_{ij} < n_d) \\ 1, & \text{quando defeito } i \text{ faz com que tensão de} \\ & \text{falta na barra } j \text{ fique igual ou acima do } \mathbf{Nível} \\ & \mathbf{de Disparo} \text{ fixado } (v_{ij} \geq n_d) \end{cases} \quad [4]$$

### C. Vetor-Redundância

Dados o Vetor-Alocação e a Matriz de Observabilidade

para um determinado sistema, conforme descrito anteriormente, o Vetor-Redundância é obtido através da multiplicação da Matriz de Observabilidade pelo Vetor-Alocação, conforme ilustrado pela expressão [5] abaixo:

$$V_{red} = MO \times V_{Aloc}^t \quad [5]$$

Isso faz com que cada posição do Vetor-Redundância contabilize o número de medidores, que dispostos segundo  $V_{Aloc}$ , são capazes de monitorar o defeito na barra correspondente a sua posição, isto é, cada posição do Vetor-Redundância indica o número de medidores sensibilizados para um determinado tipo de curto-circuito aplicado em uma barra do sistema. No caso da utilização do Vetor-Alocação Inteiro, a obtenção do Vetor-Redundância é feita através do seu equivalente Binário.

#### D. Algoritmos Genéticos

O método de busca de solução escolhido foram os Algoritmos Genéticos. O algoritmo básico do AG é constituído por quatro etapas principais:

- sorteio da população;
- avaliação;
- seleção (reprodução);
- cruzamento e mutação.

A Figura 1 ilustra como essas etapas são inter-relacionadas de maneira a constituir o AG que foi aplicado ao problema abordado neste trabalho.

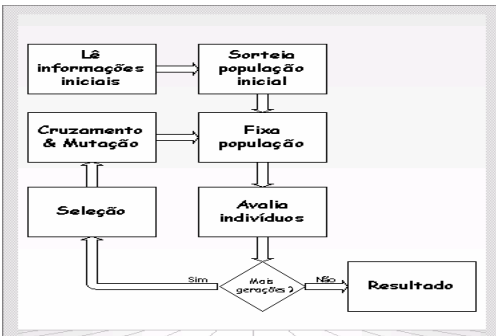


Fig. 1 - Fluxograma do Algoritmo Genético Básico

A principal finalidade das funções que constituem o AG é adequar as strings que compõem cada população de uma determinada geração, através da manipulação dos seus conjuntos de dados, de maneira que as possíveis soluções que eles constituem, cada vez mais, satisfaçam os objetivos e restrições do problema.

#### E. Tomada de Decisão Fuzzy

A Teoria de Conjuntos Fuzzy representa uma alternativa a abordagem de problemas de tomada de decisão, que podem ser encarados como problemas de otimização (pois se têm objetivos e restrições bem definidos). Sendo assim, na sua aplicação, deseja-se determinar uma solução que “satisfaça” de forma simétrica tantos os objetivos, quanto as restrições.

No caso do problema tratado neste trabalho, adotou-se uma função de pertinência para o objetivo ( $\mu_{obj}$ ), que indica o quão mais próximo de 1 (alocação mínima para monitoração de um SEP) é o número de medidores sugeridos por um possível Vetor-Alocação; e uma função de pertinência para a restrição ( $\mu_{res}$ ), que indica o quanto melhor um Vetor-Redundância está

para uma possível solução (Vetor-Alocação), considerando uma meta mínima de redundância para cada falta. A decisão que avalia se os resultados de ambos (objetivos e restrições) estão satisfatórios é feito através de uma função de pertinência de decisão ( $\mu_{dec}$ ), a qual, dessa maneira, agrega os resultados dos objetivos e das restrições. A expressão [6] ilustra a expressão descrita.

$$\text{Onde: } \mu_{dec} = \mu_{obj} \otimes \mu_{res} \quad [6]$$

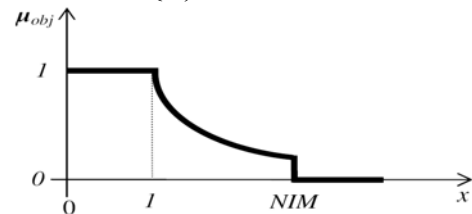
- $\mu_{obj}$ : função de pertinência para o objetivo;
- $\mu_{res}$ : função de pertinência para as restrições;
- $\mu_{dec}$ : função de pertinência para a decisão;
- $\otimes$ : representa o operador de agregação.

#### F. Aplicação

##### 1) Função-Objetivo

A função-objetivo proposta para essa modelagem alternativa do problema continua com a finalidade de minimizar o número de medidores a serem alocados segundo um Vetor-Alocação. Ela é apresentada abaixo através da expressão [7]:

$$\mu_{obj}(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } I < x < NIM \\ x, & \\ 0, & \text{se } NIM \geq x \end{cases} \quad [7]$$



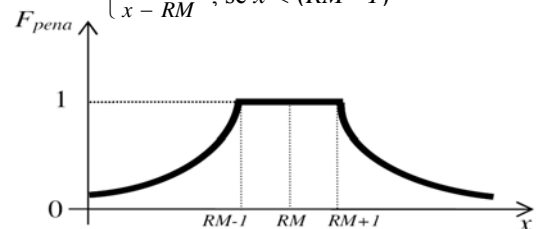
Onde:

- $x$ : é o número de medidores para alocação que o indivíduo em avaliação sugere;
- $NIM$ : é o número inaceitável de medidores para o sistema em estudo, isto é, a partir do qual o sistema de monitoração torna-se inviável.

##### 2) Função-Penalização

Já as restrições do problema para a nova modelagem foram consideradas através da função de penalização em duas etapas. Na primeira etapa, avaliou-se a redundância mínima desejada, conforme apresentado na expressão [8].

$$F_{pena}(x) = \begin{cases} \frac{1}{x - RM}, & \text{se } x > (RM + I) \\ 1, & \text{se } (RM - I) \leq x \leq (RM + I) \\ \frac{-1}{x - RM}, & \text{se } x < (RM - I) \end{cases} \quad [8]$$



Onde:

- $x$ : é a média das redundâncias para uma determinada

alocação;

- **RM**: é a redundância-média mínima definida para a avaliação (número mínimo de medidores que se deseja para monitorar cada uma dos defeitos).

Em uma segunda etapa, a fim de garantir que houvesse uma distribuição homogênea da redundância ao longo de todo o Vetor-Redundância, divide-se o resultado da função de penalização pelo número de posições nulas do próprio Vetor-Redundância, conforme está ilustrado abaixo pela expressão [9]:

$$\mu_{pena} = \frac{\mu_{res}(x)}{NRZ^3} \quad [9]$$

Onde:

- NRZ: é a o número de posições nulas do Vetor-Redundância (VRed);

Note que o expoente utilizado sobre o fator que considera o número de posições nulas intensifica o peso deste na função, de forma que seja favorecida a obtenção de Vetores-Redundância sem nenhuma posição nula, e, assim, a avaliação exercida pelo AG possa se voltar unicamente para a questão da alocação dos medidores, a fim de se minimizar o número dos mesmos.

### 3) Função-Avaliação

Para essa alternativa a modelagem do problema, a avaliação do indivíduo é fornecida através de uma função de avaliação semelhante à função de pertinência de decisão. Sendo assim, adotou-se a expressão [10]:

$$\mu_{dec} = \mu_{obj} * \mu_{pena} \quad [10]$$

Onde:

- $\mu_{dec}$  é a função de avaliação;
- $\mu_{obj}$  é a função-objetivo;
- $\mu_{pena}$  é a função de penalização.

Nessa função, o operador da multiplicação faz o papel do operador de agregação da expressão [6].

## III. RESULTADOS

Para validar a metodologia, inicialmente a avaliação feita considerou apenas a utilização de Vetor-Alocação Binário e defeitos fase-terra. Posteriormente, utilizou-se o Vetor-Alocação Inteiro e a simulação foi realizada considerando defeitos fase-terra, dupla fase-terra e trifásico, todos com impedância de defeito de  $5\Omega$ . Os defeitos foram simulados a cada 10% de cada trecho do SEP, sendo simuladas faltas em 2143 pontos diferentes, para cada tipo de defeito. e, além da avaliação individual para cada tipo de defeito, foi feita uma avaliação conjunta dos defeitos com a utilização do Vetor-Alocação Inteiro. Assim, agregando-se os três tipos de defeitos, a matriz de tensões de falta totalizava 6429 linhas (sendo 2143 linhas referentes a cada um dos três defeitos).

Para a avaliação considerando Vetor-Alocação Binário foi definida a alocação de 23 medidores nas barras circuladas por elipses tracejadas, nas Figuras 2, 3, 4 e 5. Já a avaliação considerando o Vetor-Alocação Inteiro, os resultados encontrados são apresentados na Tabela I. Nas Figuras 2, 3, 4 e 5, ilustrou-se as alocações de medidores sugerida pelos Vetores-Alocação obtidos para cada tipo de curto-circuito.

Os pontos determinados pelos Vetor-Alocação Inteiros correspondente aos defeitos trifásico foram destacados por retângulos verdes, para os defeitos dupla fase-terra por retângulos vermelhos, para os defeitos fase-terra por retângulos azuis e os referentes pontos determinados pelo Vetor-Alocação encontrado considerando os três tipos de defeitos simultaneamente foram ilustrados por retângulos amarelos.

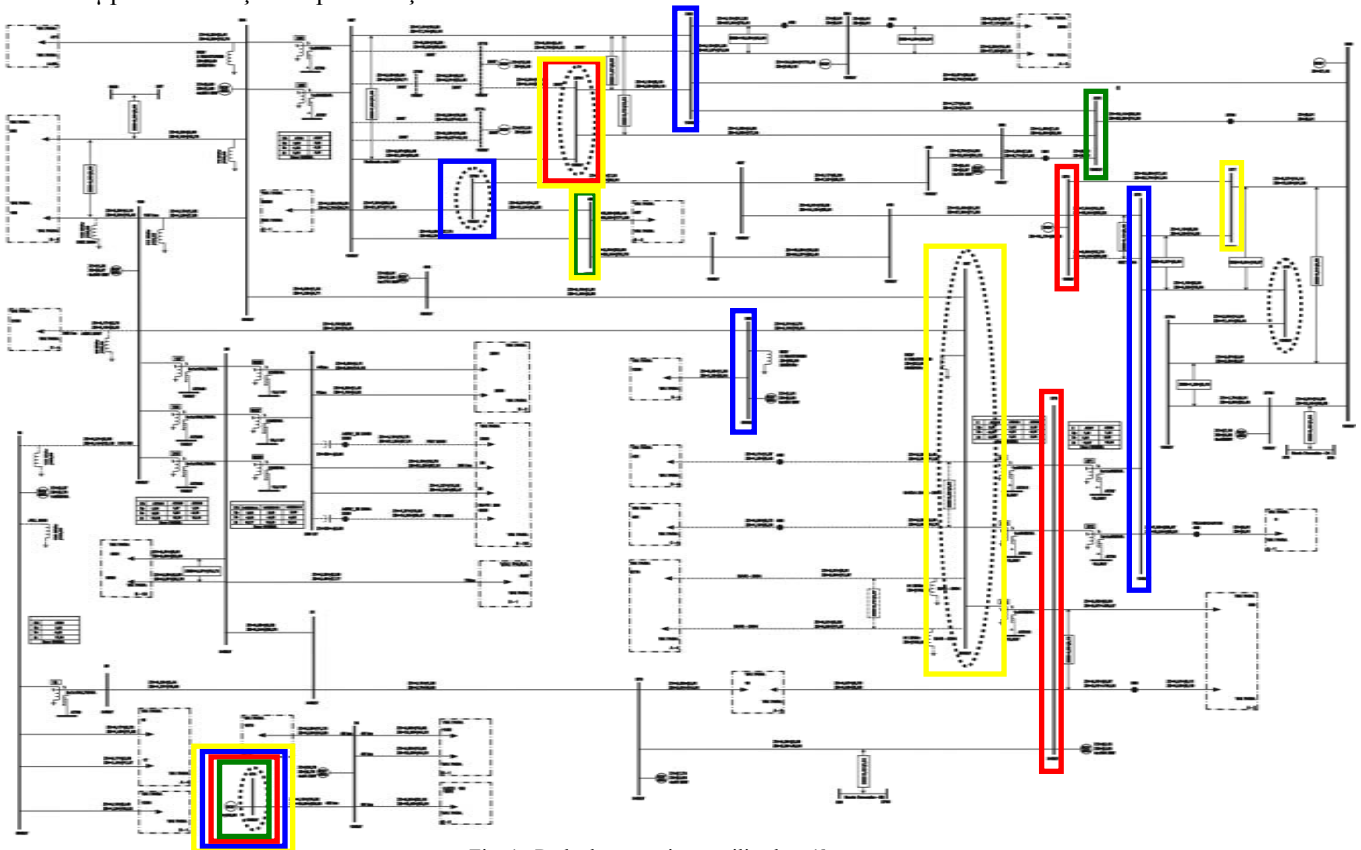


Fig. 1. Rede de transmissão utilizada – 1ª parte

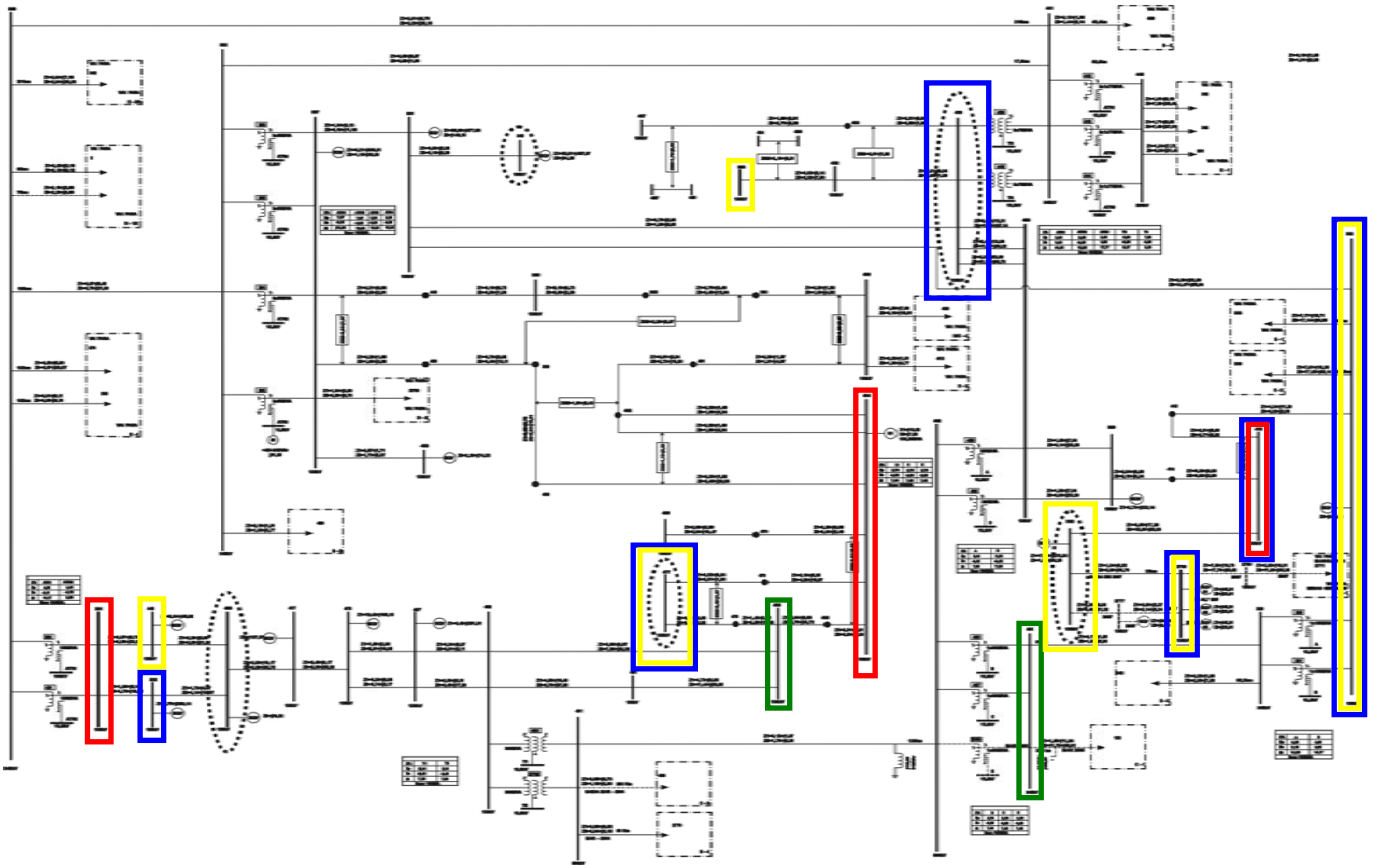


Fig. 2. Rede de transmissão utilizada – 2ª parte

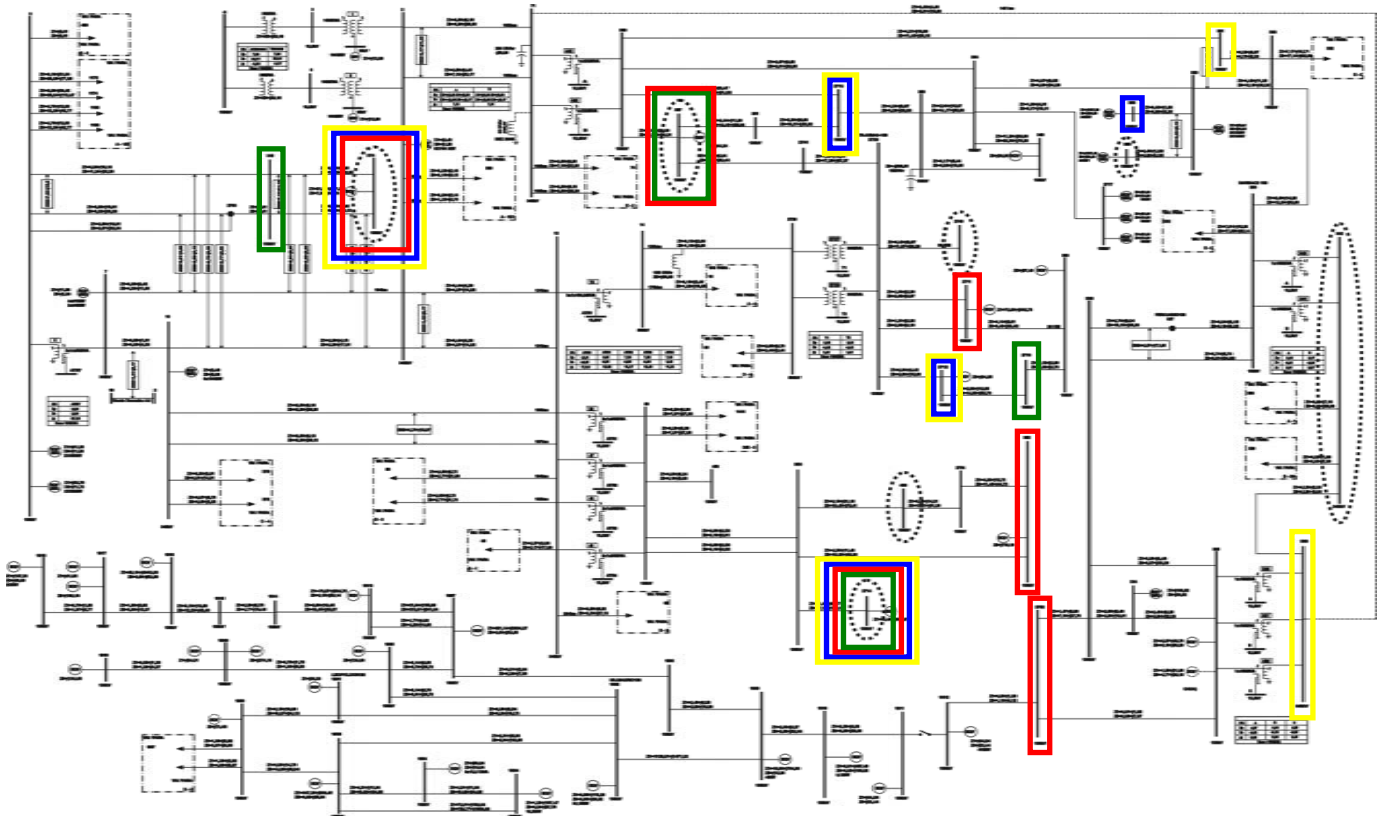


Fig. 3. Rede de transmissão utilizada – 3ª parte

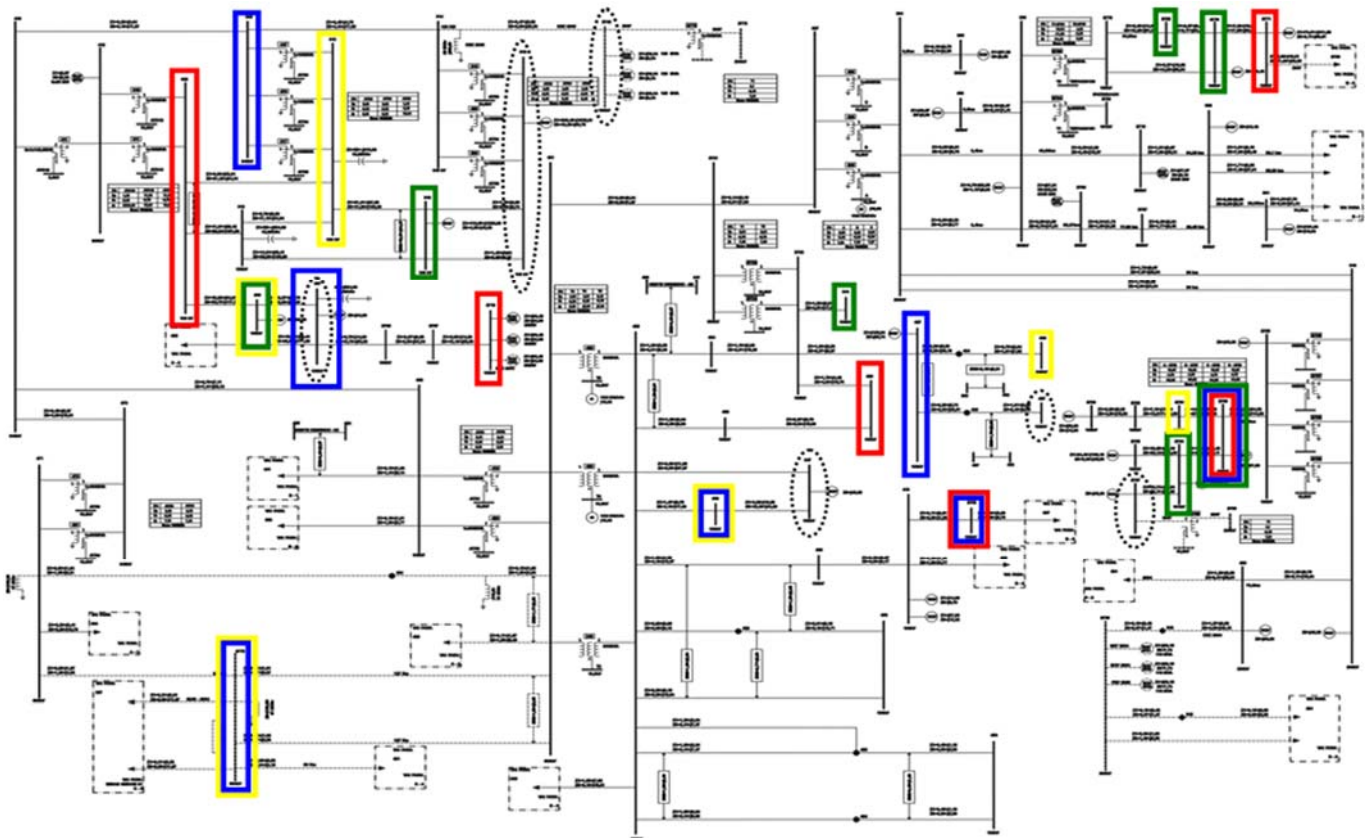


Fig. 4. Rede de transmissão utilizada – 4ª parte

Tabela I – Números de Medidores por Tipo de Defeito

Tipo Defeito	Nº. de Medidores
Fase-Terra	23
Dupla Fase-Terra	19
Trifásico	17
Todos	23

#### IV. CONCLUSÃO

Com a metodologia desenvolvida foram obtidos resultados promissores, que permitem orientar o engenheiro do planejamento de redes na aquisição de equipamentos de medição, de forma a atender necessidades conflitantes e comuns encontradas na sua atividade: “Maximizar a Capacidade de Monitoração sobre a Rede” e “Atender os Limites Orçamentários da Empresa”, uma vez que, pelo trabalho desenvolvido, averiguou-se que, para monitorar completamente a rede utilizada, o número de equipamentos necessários foi de aproximadamente 15% dos pontos da rede; Obviamente, esta porcentagem pode variar com as características do sistema elétrico, tais como intensidade e diversidade dos níveis de curto-circuito nas barras do sistema.

#### V. REFERÊNCIAS

- [01] IEEE Std. 1346. **IEEE Recommended Practice for Evaluating Electric Power System Compatibility with Electronic Process Equipment**. New York: 1998.
- [02] BOLLEN, M. H. J.; QADER M. R.; ALLAN, R. N. **Stochastic Prediction of Voltage Sags in a Large Transmission System**. New York: IEEE Transactions on Industry Applications, Jan/ Feb 1999.
- [03] OLGUIN, G. **Stochastic Assessment of Voltage Dips Caused by Faults in a Large Transmission System**. Sweden, Göteborg: Thesis for the Degree of Licentiate of Engineering, Department of Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology, 2003.

- [04] BOLLEN, M. H. J.; QADER M. R.; ALLAN, R. N. **Stochastic and Statistical Assessment of Voltage Dips**. IEE Colloquium, Tools and Techniques for Dealing with Uncertainty (Digest No. 1998/200).
- [05] BOLLEN, M. H. J. **Understanding Power Quality Problems: voltage sags and interruptions**. New York: IEEE Press Series on Power Engineering, 2000.
- [06] D. E. Golberg. “Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning”. Addison-Wesley, 1989.
- [07] N. Kagan, “Configuração de Redes de Distribuição Através de Algoritmos Genéticos e Tomada de Decisão Fuzzy”, Tese de Livre Docência, EPUSP, 1999.

#### VI. BIOGRAFIAS

**Carlos Frederico M. Almeida** nasceu em São Paulo, Brasil no dia 15 de dezembro de 1979. Formou-se técnico em eletrotécnica pela Escola Técnica Federal de São Paulo em 1998. Gradou-se em Engenharia Elétrica na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo em 2003 e obteve o título de mestre pela mesma instituição em 2007. Atualmente integra o programa de pós-graduação na Escola Politécnica da USP para obtenção do título de doutor. Suas principais áreas de interesse são Qualidade de Energia Elétrica, Distribuição e Transmissão de Energia Elétrica, Técnicas de Otimização e Inteligência Artificial.

**Nelson Kagan** nasceu em São Paulo, Brasil, no dia 8 de outubro de 1960. Gradou-se na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo em 1982. Obteve o título de mestre em 1988, pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e o título de Ph. D. em 1993 pela Universidade de Londres. Leciona na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo desde 1983, na qual é Professor Associado. Suas principais áreas de interesse são Planejamento de Sistemas de Potência e Qualidade de Energia