

UM ESTUDO SOBRE REDES SUBTERRÂNEAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Bruno Monti Gouveia (G-FEIS/UNESP)

Antonio Marcos Cossi (FEIS/UNESP)

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre sistemas subterrâneos de distribuição de energia elétrica (redes de baixa tensão - *BT* e de média tensão - *MT*) considerando os aspectos de rede (configurações, terminologias, simbologias, materiais e equipamentos) bem como a questão da análise dos parâmetros elétricos dessas redes (cálculo elétrico: queda de tensão, corrente nos ramais da rede e perdas elétricas). Foi desenvolvido um modelo matemático simples que considera em sua função objetivo os custos para construção/ampliação de redes subterrâneas mais as perdas elétricas do sistema. Trata-se de um problema de programação não linear inteiro misto (*PNLIM*). Cada configuração é avaliada através da função objetivo sujeita a análise de restrição de queda de tensão imposta ao problema. Os resultados visam apresentar custos de construção e operação de redes subterrâneas de distribuição de energia elétrica com perfil adequado de tensão para os consumidores da rede subterrânea.

Palavras-chave: redes de distribuição subterrâneas. Planejamento. fluxo de potência. matemática aplicada.

Introdução

Os estudos de expansão e/ou construção de novas redes de distribuição são baseados no sistema existente, se houver, em previsões de consumos, extensos cálculos econômicos e elétricos, além da experiência e capacidade de julgamento do planejador [1]. O problema consiste em planejar a expansão e/ou construção do sistema de distribuição (para um ou mais estágios), tanto para redes aéreas quanto subterrâneas, envolvendo etapas de planejamento e projetos dessas redes, para atender as demandas, procurando maximizar os atributos: economia, confiabilidade, segurança e qualidade de serviço do fornecimento de energia [1, 2].

O sistema de distribuição é subdividido em dois subsistemas, sendo um que tem início nas subestações de distribuição (média tensão - *MT*) e chega aos transformadores de rua, constituindo a rede primária, e o outro que tem início nos transformadores abaixadores e chega aos pontos de consumo (baixa tensão - *BT*), constituindo a rede secundária [3, 4]. As redes de distribuição de *MT* e de *BT* são em geral planejadas e projetadas para serem construídas em configurações aéreas. A rede convencional aérea, quando comparada a uma rede de distribuição subterrânea, possui as seguintes desvantagens: desproteção contra as influências do meio ambiente, ficando sujeitas a situações adversas, apresenta alta taxa de falhas e exige que sejam feitas podas drásticas nas árvores, visto que o simples contato com do condutor com um galho de árvore pode provocar o desligamento de parte da rede. No entanto, possui custos de construção, operação e manutenção menores [1].

Com o crescente aumento do consumo de energia elétrica e conseqüentemente pressões tanto dos órgãos reguladores como dos consumidores por um serviço de qualidade no fornecimento de energia por parte das empresas distribuidoras, tem feito com que essas empresas busquem soluções capazes de melhorar a confiabilidade e qualidade dos serviços prestados. Nesta concepção, as redes de distribuição subterrâneas, apesar de serem mais

complexas e de possuírem um custo mais elevado que as redes aéreas apresentam vantagens e benefícios quanto à utilização, buscando atender as expectativas de uma rede que ofereça qualidade e confiabilidade no fornecimento de energia. O custo excessivo na construção de redes subterrâneas, em comparação com a construção aérea, bem como a natureza permanente do sistema, garante um estudo cuidadoso das condições e justifica um gasto razoável para o desenvolvimento de planos adequados para o sistema, tendo em vista que o sucesso financeiro de uma empresa de fornecimento de energia elétrica depende de um serviço eficiente e confiável, mas de uma forma econômica. Portanto, para garantir este resultado, os sistemas de distribuição subterrâneos devem ser cuidadosamente planejados e projetados.

Neste trabalho é apresentado um modelo simples para análise de redes subterrâneas, que pode ser de grande importância para o desenvolvimento de uma ferramenta mais complexa para análise do planejamento dessas redes, de forma otimizada. Para validar o modelo desenvolvido, são apresentados resultados de testes feitos em um sistema projetado para ser subterrâneo.

1. Modelo para Análise de Redes Subterrâneas

O modelo para análise de redes subterrâneas de energia elétrica considera a utilização de materiais e equipamentos adequados para que essas redes possam operar com um perfil adequado de tensão para os consumidores. Para tal, foi desenvolvida uma função custo para a análise dos custos de implantação, bem como das perdas elétricas dessas redes, considerando um ano de operação. A proposta consiste em montar uma rede adotando certos materiais e equipamentos, promover a análise dos custos dessa rede e a avaliação da restrição de queda de tensão. Caso, a restrição de queda de tensão seja violada em qualquer ponto da rede, monta-se novamente o sistema utilizando materiais e equipamentos mais adequados.

A Figura 1 ilustra o esquema geral do modelo desenvolvido para montagem e análise de uma rede subterrânea.

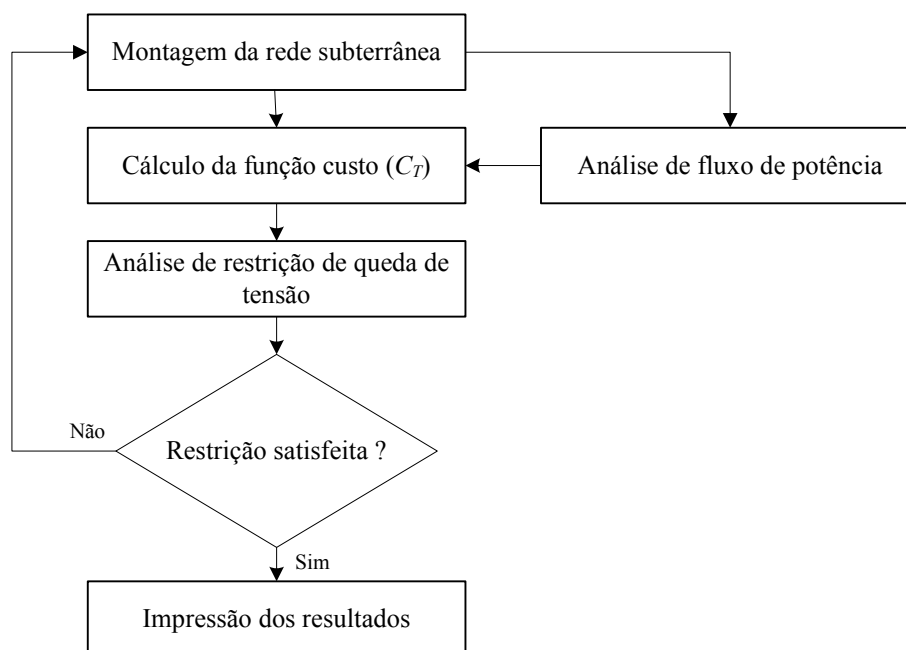


Figura 1. Processo de montagem e análise de redes subterrâneas.

1.1. Concepção das Redes Subterrâneas

A maioria dos circuitos subterrâneos deriva-se de redes de *MT* aéreas através de um poste de transição, tornando subterrânea parte da rede de *MT* aérea, passando em seguida por um Quadro de Distribuição em Pedestal (QDP), do qual se derivam os circuitos subterrâneos de *BT*, e levando assim aos consumidores finais (entrada de serviço) [5-8].

A montagem de uma rede subterrânea não é tão simples, sendo cheia de detalhes, principalmente no que diz respeito às instalações, conexões, derivações e sistema de proteção. São vários os elementos e equipamentos que compõem o sistema subterrâneo. De uma forma geral, os principais elementos e equipamentos na montagem de uma rede subterrânea são [5]:

- Poste de transição;
- Condutores isolados;
- Transformadores padronizados;
- Quadro de distribuição;
- Caixas de passagem e de inspeção;
- Terminais conectores;
- Chaves fusíveis;
- Para-raios;
- Dispositivos de proteção;
- Dutos/canaletas.

A Figura 2 ilustra o esquema geral de uma rede subterrânea.

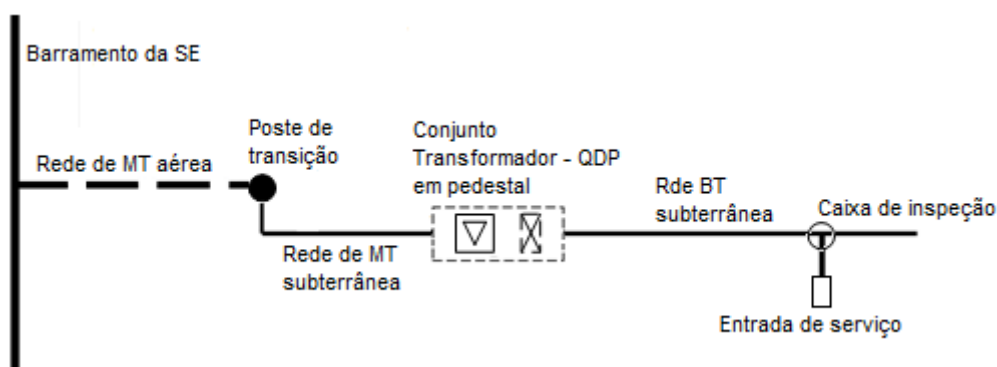


Figura 2. Esquema geral de uma rede subterrânea de distribuição.

1.2. Modelo Matemático

A função custo, para a avaliação de redes subterrâneas a serem construídas e/ou ampliadas, considera os custos de projeto e de operação (perdas elétricas) para o período de um ano, e foi desenvolvida e implementada através da linguagem de programação FORTRAN. De forma geral, essa função custo (*CT*), considerando a rede subterrânea começando a partir do poste de transição, é escrita da seguinte maneira:

$$C_T = \left\{ \begin{array}{l} \text{Custos de materiais e equipamentos, mão-de-obra (poste de transição -} \\ \text{CPT, cabos de média tensão - CCM, cabos de baixa tensão - CCB,} \\ \text{dutos de média tensão - CDM, dutos de baixa tensão - CDB, caixas de} \\ \text{passagem/derivação CCD, quadro de distribuição em Pedestal (QDP) -} \\ \text{CQD, transformador de distribuição - CTD)} \\ + \\ \text{Custos operacionais (perdas elétricas - CPE)} \end{array} \right.$$

Matematicamente, a função custo pode ser escrita da seguinte maneira:

$$C_T = CPT + \sum_{i \in NI} CCM_i + \sum_{j \in NJ} CCB_j + \sum_{i \in NI} CDP_i + \sum_{j \in NJ} CDS_j + \sum_{j \in NK} CCD_k + CQD + CTD + \sum_{j \in NJ} CPE_j$$

O custo das perdas elétricas (CPE) é dado por: $CPE_j = R_j \cdot |I_j|^2 \cdot kWh \cdot T$

sendo:

- NI : Conjunto de ramais da rede de MT ;
- NJ : Conjunto de ramais do circuito de BT ;
- NK : Conjunto de barras (caixas de passagem/derivação) do circuito de BT ;
- R_j : Impedância do cabo instalado no ramo j do circuito de BT ;
- I_j : Corrente elétrica calculada no ramo j do circuito de BT ;
- kWh : Custo do kWh em R\$;
- T : Período de um ano em horas.

Para verificar se os componentes adotados para o projeto são adequados para manter a rede operando com qualidade é verificado a restrição de limites de queda de tensão. Essa restrição de queda de tensão é dada por:

$$V_i^{\min} \leq V_i^{cal} \leq V_i^{\max}$$

sendo:

- V_i^{\min}, V_i^{\max} : Limite da magnitude de tensão na barra i (mínima e máxima) da rede primária;
- V_i^{cal} : Tensão calculada na barra i da rede primária e do circuito secundário, respectivamente;

1.3. Fluxo de Potência

Os parâmetros elétricos para avaliar quedas de tensão na rede subterrânea, bem como para calcular as perdas elétricas para um ano de operação da rede, são obtidos através do processamento do cálculo do fluxo de potência. Trata-se de um fluxo de potência monofásico para redes de BT [9]. Este método é composto por quatro equações derivadas das leis de *kirchhoff* para fazer o balanço das potências ativa e reativa nas barras do sistema sob análise. Sistemáticamente, este método do fluxo de potência para redes monofásicas é ilustrado pela Figura 3.

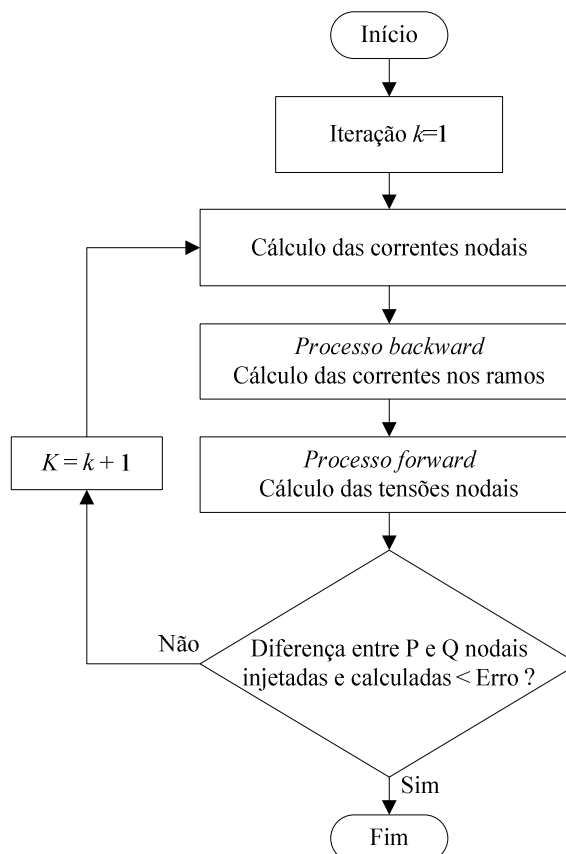


Figura 3. Procedimento para o cálculo de fluxo de potência

2. Resultados

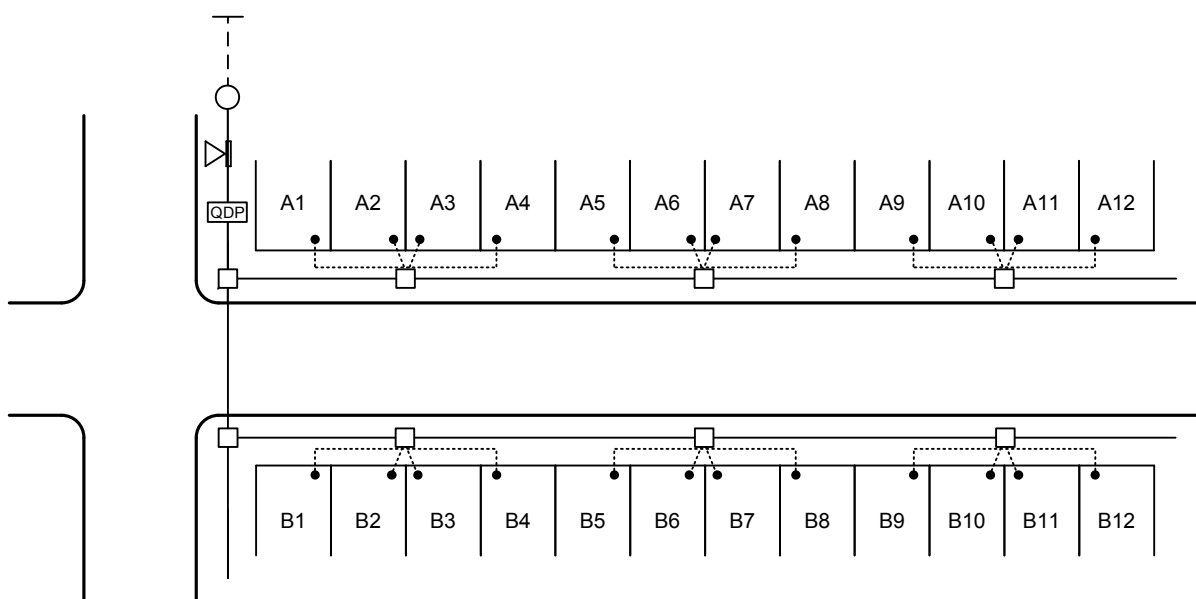
Para validar o modelo desenvolvido, foram feitos testes em um circuito subterrâneo de *BT*, o qual se deriva de uma rede aérea de *MT* através de um poste de transição. Trata-se de um circuito de um condomínio projetado para ser construído como sendo uma rede aérea. Os dados de projeto (configuração básica, materiais e equipamentos empregados, outros) foram preestabelecidos inicialmente. As perdas elétricas, bem como a análise de queda de tensão, foram obtidas tendo como base os resultados do fluxo de potência.

A Figura 4 ilustra parte do circuito de *BT* utilizado nos testes. Os dados de custos dos materiais e equipamentos, bem como dos resultados dos testes encontram-se na Tabela 1.

Os materiais e equipamentos bem como os dados de projeto adotados para montagem da rede subterrânea, são:

- Poste de transição: Poste de 12 m.
- Cabos da rede de *MT*: Cabos triplexados de 35 mm² (3 x 1 x 35 mm²) – classe de tensão 8,7/15 kV.
- Cabos da rede de *BT*: 4 cabos singelos com seção de 120 mm² (3 fases e neutro) – classe de tensão 0,6/1,0 kV.
- Dutos da rede de *MT*: Dutos de polietileno diretamente enterrados no solo com diâmetros de 4 pol.;
- Dutos da rede de *BT*: Cabos instalados em dutos de PVC, enterrados diretamente no solo.
- Quadro de distribuição em pedestal (QDP): Quadro para alimentação de circuitos com cabos de seção de 120 mm², instalado em base de concreto.

- Transformador de distribuição: Transformador em pedestal trifásico de 75 kVA e base de concreto de 1,35 x 1,00 m.
- Cabos para interligar: 4 cabos singelos com seção de 120 mm² (3 fases e neutro) – classe de tensão 0,6/1,0 kV.
- Caixas de passagens: Caixas (1,5 x 1,0 m) para 6 emendas fixas.
- Distância entre o QDP e o Trafo: 3m.
- Queda de tensão máxima admissível no circuito: 3%.



Legenda:

- Poste de transição (rede primária aérea/subterrânea)
- ▤ Transformador de distribuição em pedestal
- ▣ QDP Quadro de distribuição em pedestal (QDP)
- Caixa de passagem/derivação secundária
- - Rede aérea primária
- Banco de dutos diretamente enterrado (rede primária/secundária subterrânea)
- Ramal de ligação (ligação de consumidores)

Figura 4. Parte do circuito de BT.

Os dados de custo dos materiais e equipamentos não são reais. Os valores foram adotados tomando como base os custos de uma rede aérea com um acréscimo em torno de cinco vezes o valor da mesma. Os custos com mão-de-obra estão inclusos nos custos dos materiais e equipamentos.

Tabela 1. Dados de Custos e Resultados.

Custos (R\$)			
Parâmetros		Custo unitário	Custo parcial
Poste de transição	<i>CPT</i>	5.000,00	5.000,00
Cabos de <i>MT</i>	<i>CCM</i>	15,00/m	360,00
Cabos de <i>BT</i>	<i>CCB</i>	20,00/m	29.296,00
Dutos de <i>MT</i>	<i>CDM</i>	60,00/m	4.800,00
Dutos de <i>BT</i>	<i>CDB</i>	60,00/m	21.972,00
Caixas de passagem	<i>CCD</i>	400,00/unid.	4.400,00
Quadro de distribuição	<i>CQD</i>	3.000,00/unid.	3.000,00
Transformador	<i>CTD</i>	12.000,00/unid.	12.000,00
Perdas elétricas	<i>CPE</i>	2.993,00	2.993,00
Custo total			83821,00
Nível de tensão (V)			
V_{\min}	216,4	V_{\max}	220,0

De acordo com os resultados da Tabela 1, percebe-se um baixo custo de perdas anual quando comparado com os custos para construção da rede subterrânea. Apesar deste trabalho não contemplar este tipo de análise, pode-se prever que o custo das perdas ao longo dos anos compensa os investimentos a serem feitos na rede subterrânea. Os níveis de queda de tensão permaneceram dentro do limite máximo de queda de 3% em relação à tensão nominal, conforme mostra a Tabela 1.

Considerações Finais

A construção de redes de distribuição subterrâneas, apesar de terem um alto custo devido à sua construção civil, dos equipamentos e dispositivos de proteção utilizados, pode ser justificada devido o alto grau de confiabilidade, segurança e baixa manutenção que ambas proporcionam. Neste caso, é de fundamental importância o estudo dessas redes a fim de estabelecer critérios para a criação de modelos que possam ser usados em ferramentas computacionais capazes de gerar soluções que contemplem tanto o aspecto de planejamento quanto de projetos a um custo reduzido, mas dentro dos padrões técnicos. Assim, um estudo sobre redes de distribuição subterrâneas é de fundamental importância para se conhecer a concepção das mesmas (esquema construtivo e suas características), os principais equipamentos que compõem estas redes e os métodos e modelos que podem ser adotados para o seu estudo. Contudo, é importante o estudo de um método de fluxo de potência, que é uma ferramenta utilizada para a obtenção dos parâmetros de rede elétrica. Além disso, o estudo de um modelo um modelo mais complexo, utilizando métodos de busca de soluções, para resolver o problema de planejamento de redes aéreas é fundamental para obtenção de soluções com custos otimizados de implantação e operação, obedecendo a critérios técnicos operacionais. Este trabalho serve como base para o estudo e implementação de um modelo mais completo para o planejamento de redes subterrâneas de distribuição de energia elétrica.

Referências

- [1] COSSI, A. M. *Planejamento de redes de distribuição de energia elétrica de média e baixa tensão*. 2008. 117f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - Unesp, 2008.

- [2] AMASIFEN, J. C. C. *Algoritmo evolutivo dedicado à solução do problema de reconfiguração de sistemas de distribuição radiais*. 2003. 90f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2003.
- [3] KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B. E ROBBA, E. J. *Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica*. São Paulo: Blucher, 2005, 344p.
- [4] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST*. Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição (Módulo 2), 2010.
- [5] CPFL ENERGIA. *Rede de Distribuição Subterrânea Para Condomínios*. Projeto Elétrico, 2007.
- [6] ELETROPAULO. *Redes de Distribuição Subterrânea - 13,2 kV. Loteamentos Residenciais*, 2000.
- [7] COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS – CEMIG. *Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Primária (15 kV) – ND5.3*. Rede de Distribuição Aérea ou Subterrânea. Disponível em: <http://www.cemig.com.br/normas_tecnicas/> Acesso em: jul. 2010.
- [8] COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS – CEMIG. *Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Secundária – ND5.5*. Rede de Distribuição Subterrânea. Disponível em: http://www.cemig.com.br/normas_tecnicas/, Acessado em julho/2010.
- [9] CHENG, C. S.; SHIRMOHAMMADI, D. A. Three-phase power flow method for real-time distribution system analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, vol.10, n. 2, p. 671-679, 1995.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, pelo apoio financeiro no desenvolvimento deste trabalho de Iniciação Científica, através do Processo FAPESP 2010/12643-5.