

PLANEJAMENTO INTEGRADO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DE MÉDIA TENSÃO (MT) E DE BAIXA TENSÃO (BT) ATRAVÉS DE UM MODELO HEURÍSTICO

Mário Nogueira de Andrade Júnior (G-FEIS/UNESP)
Antonio Marcos Cossi (FEIS/UNESP)

RESUMO

Este trabalho aborda o estudo do planejamento integrado entre os sistemas de redes de distribuição de baixa tensão (BT) e de média tensão (MT), bem como a efetuação de melhorias no modelo heurístico existente para promover o planejamento integrado. O problema do planejamento de redes de BT e de MT é resolvido separadamente através da técnica de solução Tabu Search (TS). Trata-se de modelos de Programação Não Linear Inteiro Misto (PNLIM), em que as soluções são avaliadas através de uma função de adaptação que considera a função objetivo e um conjunto de restrições técnicas operacionais e financeiras. O modelo heurístico desenvolvido promove a análise de ambos os planejamentos de forma integrada, em que o planejamento de um subsistema influencia nos resultados do outro subsistema, avaliados através de uma função de adaptação que considera os custos de planejamento de ambos os subsistemas.

Palavras-chave: redes de distribuição. planejamento integrado. fluxo de potência. heurísticas.

Introdução

O problema do planejamento da expansão dos sistemas de distribuição de energia elétrica é de grande importância para as empresas distribuidoras devido o crescimento do consumo de energia elétrica e a necessidade de atender aos consumidores com qualidade de fornecimento de energia, altos índices de confiabilidade e custos competitivos. Assim, altos custos de investimentos e de operação, somados ao fato que o sistema de distribuição é o que se conecta diretamente com os consumidores, ressaltam a importância do planejamento da expansão destes sistemas. Ações desenvolvidas a partir de técnicas de otimização e heurísticas adotadas no processo de planejamento, podem acarretar ganhos substanciais nos custos de expansão e operação. Isto justifica o desenvolvimento de programas computacionais como ferramenta de análise e planejamento que promovam a confiabilidade e a qualidade do fornecimento de energia elétrica de maneira econômica, levando-se em consideração o montante dos investimentos a serem aplicados nos projetos de planejamento de redes de distribuição.

O sistema de distribuição é subdividido em dois subsistemas, primário (Média tensão - MT) e secundário (Baixa tensão - BT). Devido o elevado grau de dificuldade imposto pela natureza combinatória do problema de planejamento destes dois subsistemas, a maioria das ferramentas computacionais para análise e planejamento trata o problema do planejamento de redes de MT separadamente do planejamento dos circuitos de BT, reduzindo assim a dimensão do espaço de busca do problema [1, 2]. Poucos trabalhos são encontrados na literatura que tratam do problema do planejamento de sistemas de distribuição contemplando de forma integrada os subsistemas de MT e de BT. Tal abordagem é de grande importância já que os resultados do planejamento de um subsistema influencia nos resultados do outro, tendo como consequência um planejamento completo, ainda mais eficiente, com a redução dos custos

totais e das perdas. Neste contexto, encontra-se o trabalho desenvolvido em [5], que trata do problema de planejamento da distribuição de forma hierarquizada dos objetivos, contemplando simultaneamente aos dois subsistemas, sendo o subsistema de *MT* resolvido em um nível superior e o de *BT* no nível inferior.

Neste trabalho os problemas de planejamento de redes primárias e circuitos secundários de distribuição são formulado como problemas de programação não linear inteiro mistos (*PNLIM*) [3, 4]. Para integrar o planejamento dos sistemas de *MT* e de *BT* propõe-se uma técnica heurística composta por um conjunto de regras que são encontradas na prática ao se fazer as conexões entre as redes de *MT* e *BT* [5]. O planejamento integrado de sistemas de distribuição tem por objetivos obter resultados de forma conjunta, tanto na expansão quanto na operação do sistema como um todo, melhorando assim a qualidade técnica do serviço de fornecimento de energia elétrica a um custo total reduzido. Para isso, propõe-se um conjunto de alternativas que são analisadas interativa e hierarquicamente para interligar da melhor forma possível os subsistemas primário e secundário, e obter o planejamento otimizado do ponto de vista técnico e econômico dos sistemas de *MT* e de *BT*.

Para testar a eficiência do modelo de planejamento integrado, apresentam-se resultados de testes realizados em sistema real composto por uma rede primária e circuitos secundários de distribuição de energia elétrica [3, 4].

1. Formulação do Problema

No planejamento de redes de *BT* e de *MT* a função objetivo custos considera os custos fixos e variáveis dos elementos que compõem os sistemas de distribuição de *MT*. Os custos fixos representam os investimentos a serem feitos nas redes de *BT* e de *MT* durante o período de planejamento, e os custos variáveis representam as perdas técnicas de energia necessárias para operar a rede de distribuição [3, 4].

1.1. Planejamento de Redes de *MT*

De forma geral, a função objetivo para o planejamento de redes de *MT* pode ser escrita da seguinte forma:

$$\text{Minimizar } C_{MT} \left\{ \begin{array}{l} \text{Custos de investimentos na fase de planejamento (construção de} \\ \text{subestações, instalação/troca de condutores, instalação de} \\ \text{transformadores de distribuição, instalação de chaves de manobras)} \\ \\ + \\ \text{Custos operacionais (perdas elétricas do sistema)} \end{array} \right.$$

s. a. conjunto de restrições do problema

1.2. Planejamento de Redes de *BT*

De forma geral, a função objetivo para o planejamento de redes de *MT* pode ser escrita da seguinte forma:

$$\text{Minimizar } C_{BT} \left\{ \begin{array}{l} \text{Custos de investimentos na fase de planejamento (balanceamento de} \\ \text{cargas nas fases abc da rede, instalação/troca de condutores e} \\ \text{reposicionamento do transformador abaixador na rede)} \\ \\ + \\ \text{Custos operacionais (perdas elétricas do sistema)} \end{array} \right.$$

s. a. conjunto de restrições do problema

1.3. Restrições

As restrições físicas, financeiras, operacionais e de qualidade do serviço de fornecimento de energia elétrica consideradas nos modelos de planejamento de redes de *BT* e de *MT* [3, 4], são as seguintes:

- Fluxo de potência: São equações algébricas não-lineares (*Leis de Kirchhoff*) para determinar o estado da rede e calcular as demandas de potências ativa e reativa em todas as barras do sistema, e o cálculo do fluxo de potência nas linhas (Shirmohammadi, 1988).
- Magnitudes de tensão: Garante que o perfil de tensão para cada barra do sistema seja mantido dentro de limites preestabelecidos, conforme padrão ANSI C84.1, evitando grandes variações de tensão na rede.
- Máximo fluxo de corrente permitido nos ramais: Assegura que a capacidade de fluxo de corrente nos ramais existentes e planejados da rede deve ser mantido dentro de seus limites físicos de operação durante o período de planejamento, operando em condições normais ou sob contingências.
- Capacidade de operação das subestações: Determina que a capacidade de energia disponível da subestação deve ser suficiente para atender a demanda nas condições de funcionamento normal ou sob contingências durante o período de planejamento.
- Capacidade de operação dos transformadores de distribuição: Estabelece que a capacidade do transformador de distribuição deve ser suficiente para atender a demanda durante o período de planejamento.
- Instalação e/ou troca de condutores: Estabelece que apenas um tipo de condutor pode ser escolhido para ser instalado ou substituído nos ramais da rede, durante a fase de planejamento.
- Radialidade do sistema: Segundo a teoria de grafos, deve assegurar que cada alimentador da rede de distribuição de *MT* funcione de acordo com uma topologia que forma uma árvore.
- Recursos financeiros disponíveis: Garante que os investimentos para o plano de expansão/melhorias na rede deve estar dentro dos recursos financeiros disponíveis no período considerado.

2. TÉCNICAS DE SOLUÇÃO

2.1. Planejamento de redes de *BT* e de *MT*

Os planejamentos de redes de *BT* e de *MT* são resolvidos separadamente. Para resolver o problema desses planejamentos é utilizado um algoritmo *TS* adaptado para cada planejamento, considerando as características de cada rede [3, 4]. O algoritmo *TS* foi desenvolvido para explorar as características específicas do problema de planejamento, obter confiabilidade dos resultados e eficiência computacional [6, 7]. Para mapear as possíveis soluções para os problemas de planejamento de redes de *BT* e de *MT* é utilizada uma codificação em base decimal inteira que determina as propostas de planejamento tanto para

redes de *BT* como de *MT*. Para encontrar as soluções topológicas para as redes de *BT* e de *MT*, o algoritmo TS utiliza um sistema de vizinhança baseado na troca de ramos (ramos que entram e saem da rede). Cada proposta de solução é avaliada através de uma função de adaptação ($f_{a_{BT}}$ para o planejamento de rede de *BT* e $f_{a_{MT}}$ para o planejamento de redes de *MT*) que considera a função objetivo sujeita a um conjunto de restrições técnicas, físicas e financeiras. Os parâmetros elétricos para o cálculo da função objetivo e avaliação das restrições são obtidos via processamento de cálculo de fluxo de potência [8, 9].

2.2. Planejamento Integrado

Para promover o planejamento integrado entre redes de *BT* e de *MT* foi desenvolvido um modelo heurístico (conjunto de regras) [5]. O modelo heurístico considera um conjunto de alternativas de integração resolvidas de forma hierárquica. A integração entre os sistemas de *BT* e de *MT* é realizada através dos alimentadores de *MT* que deverão possuir os possíveis pontos para a instalação dos transformadores abaixadores e derivação dos circuitos de *BT* (Conjunto de pontos de integração – *CPI*). Para tal, deve-se conhecer o roteamento dos alimentadores primários e os possíveis e ramais de interconexão com os circuitos de *BT* (Conjunto de propostas – *CP*). A seleção desses ramais de interconexão (*CP*) pode ser considerada então como uma expansão do subsistema de *MT*. Assim, o planejamento integrado é efetuado da seguinte forma: (1) Resolve-se o planejamento da rede de *MT* considerando uma proposta de interconexão com o circuito de *BT* (*CP*), de acordo com uma lista de propostas que deve conter possíveis pontos de integração (*CPI*), e com base no crescimento de carga do sistema (expansão ou construção de um novo circuito secundário); (2) Resolve-se o planejamento do circuito de *BT* de acordo com a proposta de integração adotada no planejamento de *MT*; (3) Com base nos resultados de ambos os planejamentos, é feita a avaliação do custo global do planejamento para cada proposta de integração, através de uma função de adaptação f_a , definida como:

$$f_a = f_{a_{BT}} + f_{a_{MT}}$$

A melhor solução é aquela que contempla a integração com um menor custo de planejamento, mas de forma que obedeça aos critérios técnicos de operação da rede. Na Figura 3 ilustra-se o diagrama de blocos do modelo de planejamento integrado entre os sistemas de *BT* e de *MT*. O diagrama da Figura 1 ilustra de forma geral a heurística proposta para promover o planejamento integrado dos subsistemas de *BT* e de *MT*.

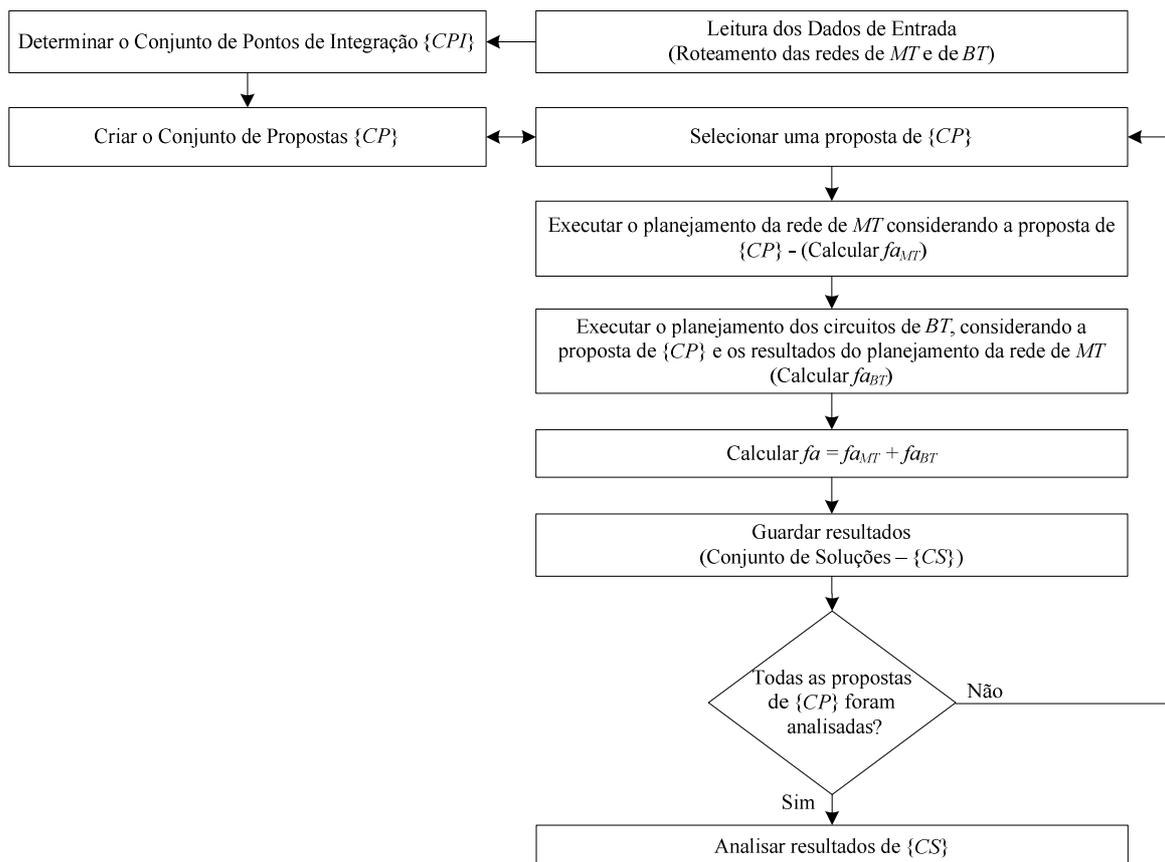


Figura 1. Diagrama ilustrativo da metodologia proposta para o planejamento integrado entre os subsistemas de *BT* e de *MT*.

3. Resultados

Para avaliar a metodologia proposta para promover o planejamento integrado, apresentam-se resultados de testes realizados em sistemas de distribuição de energia elétrica reais, com algumas alterações de forma a abranger diversas opções de integração entre os subsistemas de *BT* e de *MT*. A rede de *BT* é composta por 71 ramais [4] e a de *MT* por 62 ramais existentes e 35 propostos para expansão e/ou integração [3] com a rede de *BT*. A Figura 2 ilustra parte dos subsistemas de *BT* e de *MT*, destacando-se os pontos (*CPI*) e propostas (*CP*) de integração entre esses subsistemas. A Tabela 1 ilustra os resultados obtidos para cada proposta de integração.

De acordo com a Figura 2, temos como conjunto de pontos candidatos de integração (*CPI*) entre os subsistemas de *BT* e de *MT*, as seguintes opções de barras do sistema: barra com o transformador existente, barras onde existe rede de *MT* juntamente com a rede de *BT*; barra considerada o centro de cargas da rede de *BT*; uma barra à direita e outra à esquerda do centro de cargas da rede de *BT*. O conjunto de propostas (*CP*) é determinado para cada ponto candidato de integração através das possibilidades de roteamento do sistema (ramais da rede). O número de pontos candidatos à esquerda e à direita do centro de cargas da rede de *BT* é determinado de acordo com o tamanho do sistema.

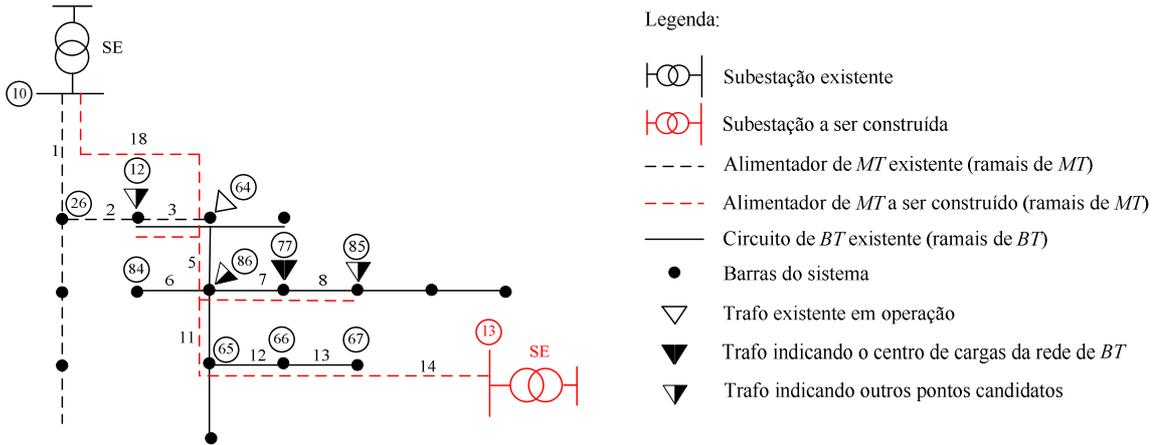
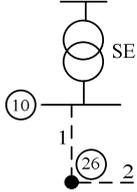


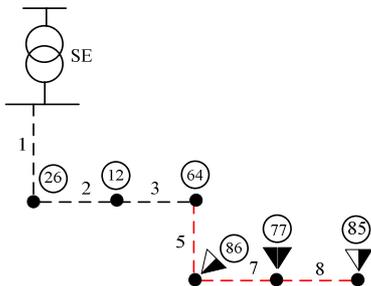
Figura 2. Parte do sistema de BT e de MT com as propostas de integração (CP).

1. Propostas de integração (CP): Pontos candidatos (CPI) na rede de MT existente



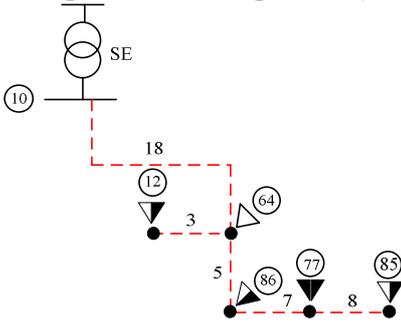
- Pontos candidatos (barras do sistema)
 $CPI = \{12, 64\}$
- Propostas (ramais do sistema de MT)
 $CP_1 = \{1, 2\}$
 $CP_2 = \{1, 2, 3\}$

2. Propostas de integração (CP): Pontos candidatos (CPI) estendendo a rede de MT existente



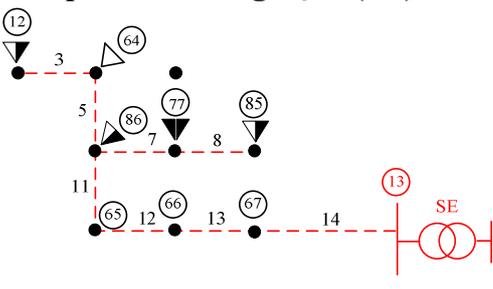
- Pontos candidatos (barras do sistema)
 $CPI = \{86, 77, 85\}$
- Propostas (ramais do sistema de MT)
 $CP_3 = \{1, 2, 3, 5\}$
 $CP_4 = \{1, 2, 3, 5, 7\}$
 $CP_5 = \{1, 2, 3, 5, 7, 8\}$

3. Propostas de integração (CP): Construção de um novo alimentador na SE existente



- Pontos candidatos (barras do sistema)
 $CPI = \{64, 12, 86, 77, 85\}$
- Propostas (ramais do sistema de MT)
 $CP_6 = \{18\}$
 $CP_7 = \{18, 3\}$
 $CP_8 = \{18, 5\}$
 $CP_9 = \{18, 5, 7\}$
 $CP_{10} = \{18, 5, 7, 8\}$

4. Propostas de integração (CP): Construção de nova SE e novo alimentador



- Pontos candidatos (barras do sistema)
 $CPI = \{86, 77, 85, 12, 64\}$
- Propostas (ramais do sistema de MT)
 $CP_{11} = \{14, 13, 12, 11\}$
 $CP_{12} = \{14, 13, 12, 11, 7\}$
 $CP_{13} = \{14, 13, 12, 11, 7, 8\}$
 $CP_{14} = \{14, 13, 12, 11, 5\}$

$$CP_{15} = \{14, 13, 12, 11, 5, 3\}$$

Tabela 1. Resultados (Propostas de Integração)

Propostas	Custos (US\$)			Propostas	Custos (US\$)		
	$f_{a_{BT}}$	$f_{a_{MT}}$	f_a		$f_{a_{BT}}$	$f_{a_{MT}}$	f_a
CP_1	2261,51	15451,62	17713,13	CP_9	2101,22	17320,04	19421,26
CP_2	2229,85	15489,40	17719,25	CP_{10}	2213,77	17396,76	19610,53
CP_3	2190,55	15521,11	17711,66	CP_{11}	2209,55	18433,46	20643,01
CP_4	2101,22	15616,85	17718,07	CP_{12}	2101,22	18772,24	20873,46
CP_5	2213,77	15771,41	17985,18	CP_{13}	2213,77	19218,91	21432,68
CP_6	2229,85	16759,26	18989,11	CP_{14}	2229,85	19603,09	21832,94
CP_7	2261,51	16928,89	19190,40	CP_{15}	2261,51	20002,66	22264,17
CP_8	2209,55	17289,93	19499,48				

De acordo com os resultados da Tabela 1, analisando o planejamento de redes de *BT*, a melhor solução se deu através do ponto de integração 77 (centro de cargas do circuito) que são as propostas CP_4 , CP_9 e CP_{12} . Para o planejamento da rede de *MT*, a melhor solução se deu através da proposta CP_1 cujo ponto de integração 12 considera o conjunto de cargas próximo da SE e conseqüentemente menores custos com cabos e perdas. No entanto, avaliando o sistema integrado (redes de *BT* e de *MT* em conjunto) a melhor solução se deu através da proposta CP_3 . Neste caso, obteve-se uma solução melhor que as soluções efetuando-se os planejamentos separadamente. As demais soluções obtiveram um custo mais alto devido à construção de novos ramais (expansão da rede de *MT* existente e construção de um novo alimentador), nova SE, e em alguns casos maiores perdas elétricas devido à distância entre o conjunto de cargas e a fonte (*SE*).

Considerações Finais

No planejamento integrado, a melhor solução é aquela que contempla a integração com um menor custo de planejamento, mas de forma que obedeça aos critérios técnicos, físicos e financeiros para novos investimentos nos sistemas de *BT* e de *MT*. Os resultados dos testes realizados mostram que a metodologia proposta permite obter soluções otimizadas para o problema de planejamento de circuitos de *BT* e redes de *MT*. A qualidade destas soluções depende do conjunto de opções possíveis para integrar a rede de *MT* e os circuitos de *BT*, que é construído com base na experiência do planejador e nas condições geográficas, elétricas e físicas do sistema sob estudo. Além disso, no planejamento integrado, obtêm-se não apenas uma única solução, mas um conjunto de soluções otimizadas propiciando ao planejador adotar a que for mais conveniente para o momento, como mostram os resultados dos testes realizados. Para solução dos modelos de planejamento das redes de *BT* e de *MT* pode ser utilizadas qualquer uma das metaheurísticas encontradas na literatura.

REFERÊNCIAS

- [1] GÖNEN, T. *Electric Power Distribution System Engineering*. New York: McGraw-Hill, 1986.
- [2] KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B. E ROBBA, E. J. *Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica*. São Paulo: Blucher, 2005. 344p.



- [3] 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.
- [4] COSSI, A. M.; ROMERO, R.; MANTOVANI, J. R. S. “Planning and projects of secondary electric power distribution systems”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, Issue 3, p. 1599-1608, 2009.
- [5] SILVA, M. C. *Planejamento a longo prazo em sistemas de distribuição de energia elétrica*. 1990. 153f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e da Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1990.
- [6] GLOVER, F. *Tabu Search Fundamentals and Uses*, University of Colorado, Bolder, Colorado, 1985. 85 p.
- [7] GLOVER, F.; KOCHENBERGER, G. A. *Handbook of metaheuristics*. New York: Springer, 2003. 570p.
- [8] 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, no. 2, p. 671-679, 1995.
- [9] CIRIC, R. M.; FELTRIN, A. P; OCHOA, L. F. “Power flow in four-wire distribution networks general approach”, *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 18, n. 4, p. 1283-1290, 2003.

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 2010/12435-3.