

## TABU SEARCH REATIVO (*TSR*) APLICADO NO PLANEJAMENTO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DE MÉDIA TENSÃO (*MT*)

*Shiguelo Yonashiro Neto (G-FEIS/UNESP)*

*Antonio Marcos Cossi (FEIS/UNESP)*

### RESUMO

Este trabalho tem como objetivo o estudo de um modelo de planejamento de redes de distribuição de média tensão (*MT*) através das ações de planejamento, modelo matemático e técnica de solução, bem como propor melhorias no modelo através de uma adaptação na técnica de solução conhecida como Tabu Search (*TS*). Trata-se de estudos e implementação da técnica conhecida como Tabu Search Reativo (*TSR*). O modelo é formulado como um problema de programação não linear inteiro misto (*PNLIM*) que considera em sua função objetivo os custos fixos e variáveis para expansão/operação da rede de *MT*, sujeita a avaliação de um conjunto de restrições impostas ao problema. Cada solução é avaliada através de uma função de adaptação mediante análise do cálculo de fluxo de potência para redes radiais. Para testar a eficiência do algoritmo implementado são apresentados resultados de testes em um sistema de distribuição de *MT*.

**Palavras-chave:** redes de distribuição. Planejamento. fluxo de potência. Tabu Search Reativo.

### Introdução

O planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica está relacionado com o aumento do consumo de energia e a necessidade de realizar novos investimentos para atender requisitos técnicos e operacionais das redes. O aumento de consumo está relacionado com as condições sócio econômicas da região em que se localiza o sistema sob análise, seja através da ligação de novos consumidores aos sistemas existentes, ou através da criação de novas áreas residenciais, comerciais e industriais que devem ser energizadas, tornando o problema do planejamento de grande importância para as empresas distribuidoras de energia elétrica devido aos investimentos que devem ser feitos [1, 2].

O planejamento de redes primárias de distribuição de energia elétrica visa à expansão do sistema e compreende a construção e/ou repotencialização de subestações, construção de novos alimentadores e a possível troca de condutores dos alimentadores existentes (recondutoramento) para um estágio ou vários estágios considerando o horizonte de planejamento [3]. Este tipo de planejamento tem por objetivo determinar onde, quando e que tipos de componentes devem ser instalados e/ou construídos ao longo do período de modo a satisfazer as necessidades dos serviços de distribuição de energia elétrica com especificações de qualidades técnicas, operacionais e de menor custo possível. Trata-se de um problema de programação matemática de grande porte envolvendo variáveis reais e inteiras, devendo atender um conjunto de restrições operacionais e financeiras [3, 4].

Para a solução do modelo de planejamento de sistemas de distribuição é proposto um algoritmo Tabu Search Reativo (*TSR*) [3, 5]. O *TRS* implementado utiliza como esquema de codificação números inteiros para representar as variáveis do problema (linhas existentes e futuras e o tipo de condutor em cada ramal) [3]. O *TSR* além de utilizar uma lista de atributos proibidos (lista tabu) com critério de aspiração baseado em memória de curto prazo para

prevenir ciclos e evitar voltar em configurações já visitadas, possui outra lista que atua tornando o tamanho da lista tabu variável e através de um mecanismo chamado escape, intensificando ou diversificando o processo na busca por soluções de boa qualidade [6, 7].

Para testar a eficiência da metodologia apresentada e implementada, apresentam-se resultados de testes para um sistema da literatura.

## 1. Formulação Do Problema

No planejamento de redes de *MT* a função objetivo considera os custos fixos e variáveis dos elementos que compõem os sistemas de *MT*. Os custos fixos representam os investimentos a serem feitos nas redes 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. 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*, 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. Técnica De Solução

A técnica de solução utilizada para o problema de planejamento de redes primárias de distribuição de energia elétrica é um algoritmo Tabu Search Reativo (*TSR*) [3]. O algoritmo *TSR* foi desenvolvido para explorar as características específicas do problema de planejamento para obter confiabilidade dos resultados e eficiência computacional. A seguir são apresentadas as características do algoritmo proposto [3, 5].

O algoritmo *TSR* parte de uma configuração inicial com o conjunto de vizinhos conhecidos. A partir da configuração inicial são gerados os vizinhos dessa configuração. O melhor vizinho encontrado passa a ser a solução semente para o próximo ciclo de busca por soluções. Para cada proposta de solução é calculada uma função de adaptação (*fa*) que considera a função objetivo e o conjunto de restrições do modelo. Esta função é modelada considerando os custos de investimentos, de operação e as penalizações das restrições violadas: magnitude de tensões das barras, fluxos de potência nos alimentadores, capacidade de operação das subestações e recursos financeiros disponíveis. Para calcular a função de adaptação e considerar as restrições de atendimento das demandas, utiliza-se um algoritmo de fluxo de potência monofásico, através do qual obtém-se as perdas do sistema [8, 9].

A estrutura de vizinhança é dividida em duas partes [3]. A primeira, referente à criação de rotas dos alimentadores, é baseada na técnica de troca de ramos realizada em duas zonas: intrazona - realiza a troca de ramos conectados a uma mesma subestação e interzona - realiza a troca de ramos conectados em subestações diferentes. Esta técnica consiste em adicionar ramos que não fazem parte da configuração corrente formando uma nova topologia (árvore) como proposta de solução para o problema de planejamento. Para manter a radialidade do sistema, um outro ramo (aresta) é retirado desta configuração proposta, diferentemente daquele que foi adicionado. Assim, um vizinho de uma configuração corrente é qualquer sistema que seja diferente em um ramo desta configuração, conservando a radialidade do sistema. A segunda estrutura de vizinhança refere-se à escolha da bitola do cabo a ser substituído (recondutorado) ou alocado no sistema. Essa escolha é feita através da avaliação das condições de fluxo para os condutores existentes na configuração sob estudo e para aqueles pertencentes ao conjunto de condutores candidatos a serem alocados.

O critério de convergência consiste em analisar a solução incumbente durante o processo iterativo. Se a solução incumbente não apresenta melhoria durante um número especificado de iterações o processo é considerado convergido.

### 2.1. Algoritmo Tabu Search Reativo (*TSR*)

O esquema de Busca Tabu Reativa (*TSR*) é um mecanismo simples que torna variável o tamanho da lista Tabu [3, 5]. No problema de planejamento, a lista tabu armazena os atributos usados na troca de ramos (ramos que saem e entram no sistema) para gerar as configurações vizinhas, tornando-os proibidos durante um certo número *k* de iterações [6, 7].

Os atributos das configurações proibidas são também armazenados em uma outra lista de forma que depois do último movimento pode-se checar se ocorrem repetições desses

mesmos atributos durante um certo número de iterações  $k1$ . O mecanismo reativo básico aumenta rapidamente o tamanho da lista tabu quando ocorrem repetições destes atributos. No entanto, se durante um certo número especificado de iterações  $k2$  a lista tabu não variar de tamanho, devido ao fato de não estarem ocorrendo repetições das configurações em análise, ocorre de forma lenta a redução da lista.

Se durante o processo forem encontradas configurações de boa qualidade (configurações cuja função de adaptação seja melhor que a incumbente), mas que compartilham atributos proibidos é satisfeito o critério de aspiração eliminando a proibição retirando estes atributos da lista tabu.

Durante a evolução do processo, se o tamanho da lista tabu crescer muito fazendo com que todos os movimentos se tornem proibidos e nenhum critério de aspiração seja satisfeito, ocorre um mecanismo chamado escape diversificando o processo na busca por novas soluções. Este mecanismo consiste basicamente num procedimento de natureza aleatória, ou seja, quando o mecanismo escape é acionado o processo é reiniciado através de uma configuração corrente obtida de maneira aleatória, tentando desta forma diversificar o processo na busca por novas soluções, distanciando dos pontos de ótimos locais e evitando fenômenos de ciclagem.

A Figura 1 ilustra a Algoritmo desenvolvido para o problema de planejamento de redes de *MT* utilizando *TSR*.

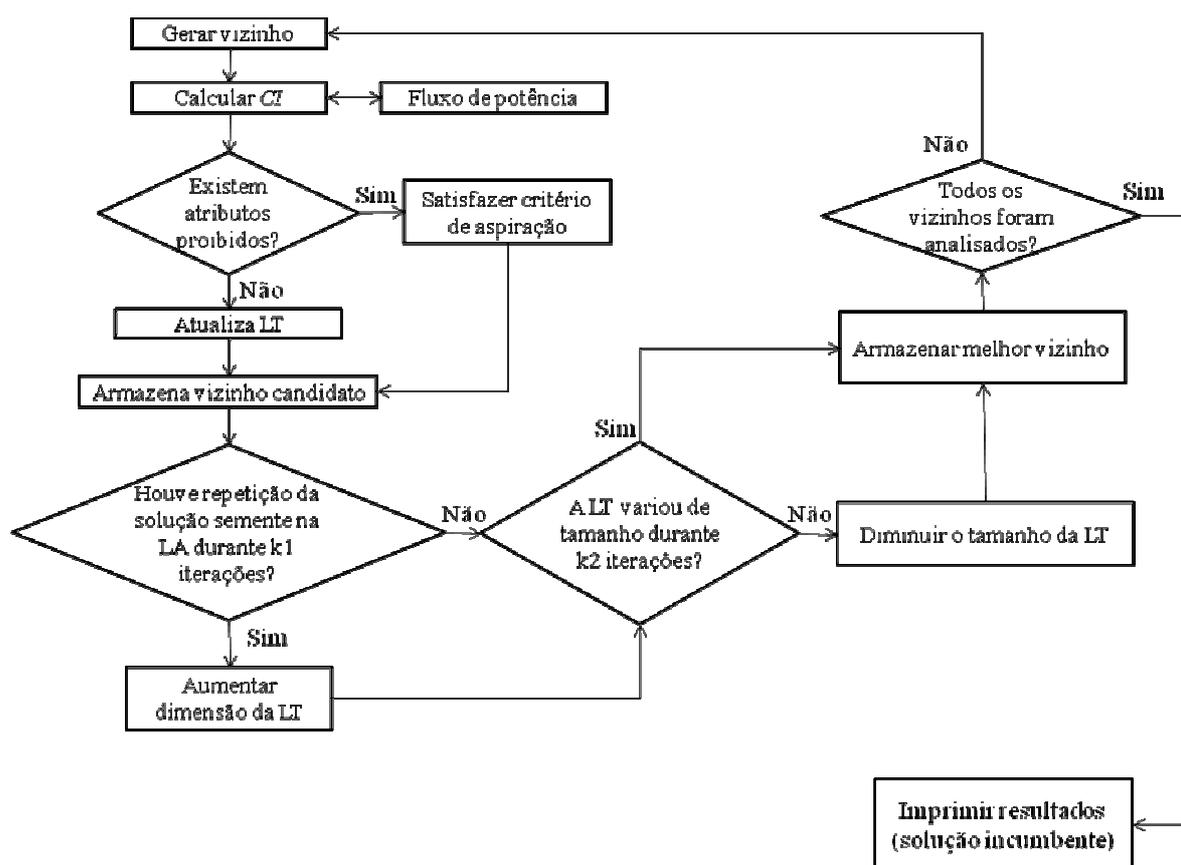


Figura 1. Algoritmo para o problema de planejamento de redes de *MT* utilizando *TSR*

### 3. Resultados

Para mostrar a eficiência do algoritmo *TSR* proposto, são apresentados resultados de testes feitos em uma rede de *MT* constituída por duas subestações existentes e duas que podem ser construídas durante o período de planejamento, além de 16 alimentadores existentes e 45 que podem ser construídos para atender novas cargas. A Figura 2 ilustra a configuração tida como solução para o problema de planejamento, com a adição das novas cargas. A Figura 3 ilustra o comportamento do algoritmo *TSR* durante o processo iterativo – (a) variação da Lista Tabu de acordo com o número de iterações e, (b) Melhor vizinho e solução incumbente de acordo com o número de iterações. A Tabela 1 ilustra os resultados do sistema de *MT* tido como solução.

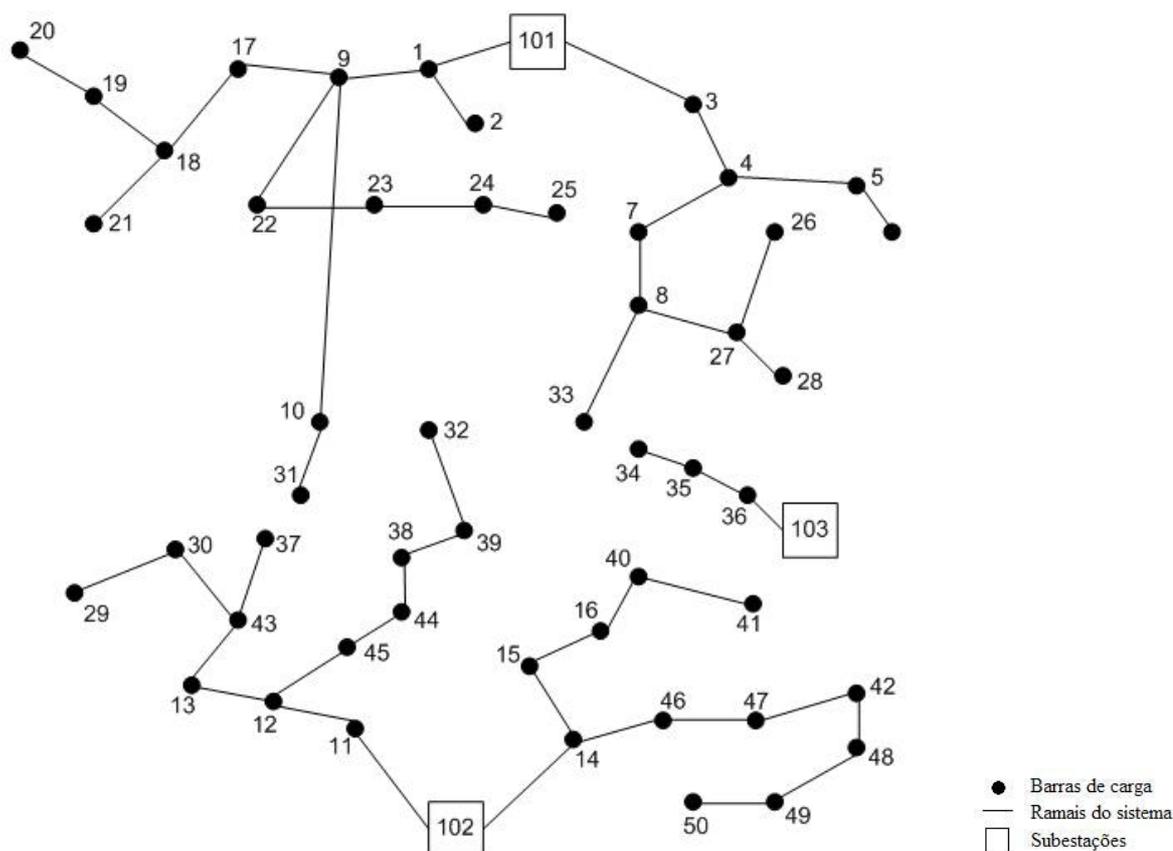


Figura 2. Configuração solução.

De acordo com a configuração solução da Figura 2, todos os pontos de carga foram adicionados ao sistema, constituindo assim o planejamento de uma rede em expansão. Para atender todos os pontos de carga, foi necessária a construção de mais uma subestação (SE 103). Cada proposta de solução foi avaliada através da função de adaptação que considera a função objetivo e penalizações caso alguma restrição seja violada. As penalizações consistem em aumentar consideravelmente o valor da função objetivo fazendo com que estas soluções sejam descartadas do processo na busca por soluções.

Tabela 1. Resultados

Custo (R\$)	Sistema solução
Operação	12.486,41
Subestação	300.000,00
Condutores	90,600.00
Total	403.086,40
Tensão (kV)	
$V_{\max}$	$V_{\min}$
13,8	13,4

Os resultados da Tabela 1, referem-se a custos para o sistema otimizado (menor custo), mas obedecendo aos critérios técnicos operacionais de redes de distribuição e atendendo a todos os consumidores. Pode-se notar que o valor mínimo de tensão encontrado teve uma queda de tensão entorno de 2,9% do valor nominal, ficando acima do limite máximo de queda de tensão que é 5% do valor nominal.

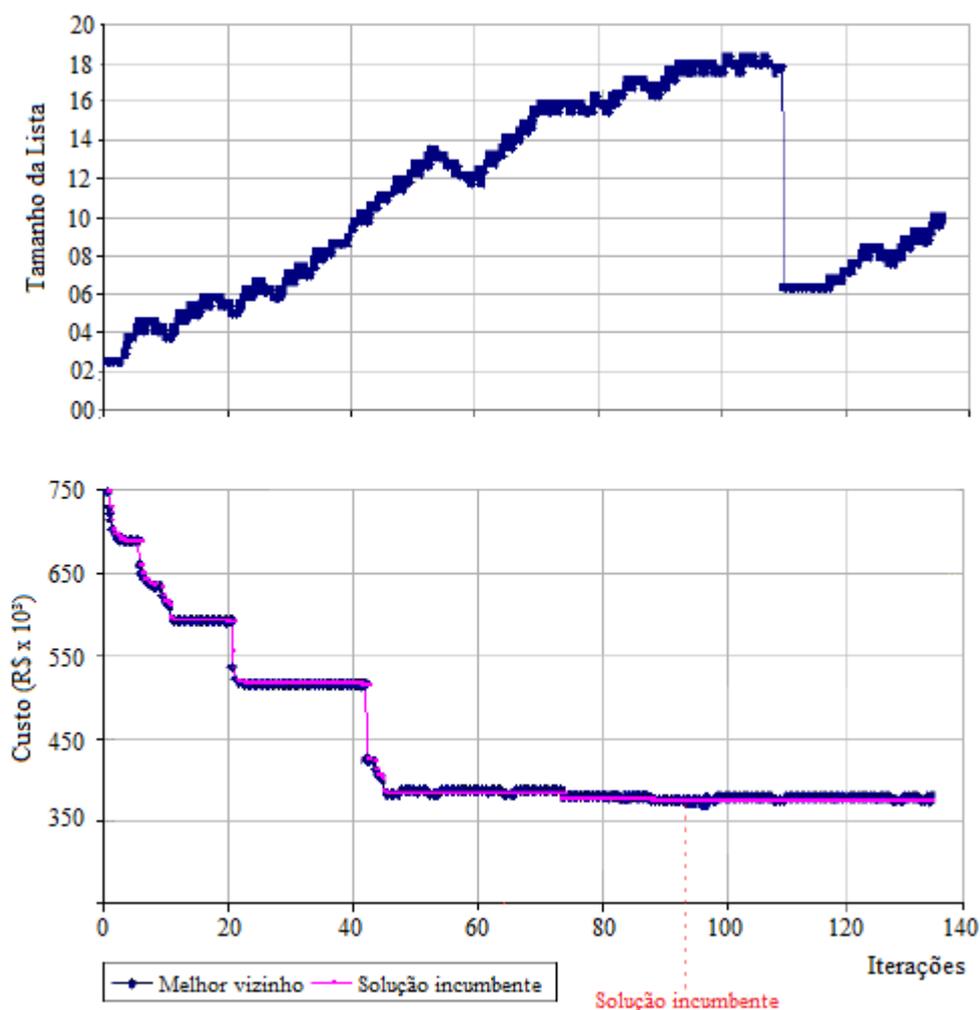


Figura 3. Comportamento do Algoritmo *TSR* de acordo com o número de iterações – (a) Tamanho da Lista Tabu; (b) Melhor vizinho e solução incumbente.

A técnica *TSR* adotada é uma técnica simples em que o mecanismo reativo substitui as técnicas avançadas de Tabu Search intensificando ou diversificando o processo em busca das soluções de boa qualidade. De acordo com os testes realizados, as soluções encontradas ilustram o comportamento da convergência do algoritmo *TSR* de acordo com a evolução do tamanho da lista tabu durante o processo iterativo. Neste caso, o Algoritmo *TSR* convergiu para a solução que apresenta uma configuração com um perfil adequado de tensão para as cargas e custos reduzidos. As decisões dos investimentos adotados no sistema referem-se à construção de nova subestação e alimentadores (instalação de cabos), troca de cabos em alguns trechos da rede (recondutoramento), além da análise de perdas do sistema. De acordo com Figura 3-a, percebe-se que o tamanho da lista tabu cresce muito tornando todos os atributos proibidos. Neste momento é acionado o mecanismo de escape reiniciando o processo através de uma solução escolhida aleatoriamente, diferentemente da solução corrente. No entanto, de acordo com a Figura 3-b, percebe-se que a solução incumbente (melhor solução), já havia sido encontrada antes de ser acionado o mecanismo de escape.

### 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”, Nova 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.; ROMERO, R.; FELTRIN, A. P.; MANTOVANI, J. R. S. Planejamento de redes primárias de distribuição através de um modelo de programação não linear inteiro misto e busca tabu reativa. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 37, 2005, Gramado. *Anais...* Gramado: SBPO, 2005. p.1418-1429.
- [4] GOSWAMI, S. K. Distribution system planning using branch exchange technique. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v.12, n.2, p.718-723, 1997.
- [5] BAYKASOGLU, A.; OWEN, S.; GINDY, N. Solution of goal programming models using a basic taboo search algorithm. *Journal of Operational Research Society*, Nottingham, v.50, n.9, p.960-973, 1999.



- [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, pp. 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, vol. 18, no. 4, pp. 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 2010/12803-2.