

MÉTODOS HEURÍSTICOS PARA ALOCAÇÃO ÓTIMA DE RECURSOS DE MANUTENÇÃO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Eduardo Tadeu Bacalhau

Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - UNICAMP
Cidade Universitária Zeferino Vaz, Av. Albert Einstein, 400. CEP.:13083-852, Campinas - SP
E-mail: dudubaca@densis.fee.unicamp.br

Celso Cavellucci

Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - UNICAMP
Cidade Universitária Zeferino Vaz, Av. Albert Einstein, 400. CEP.:13083-852, Campinas - SP
E-mail: celsocv@densis.fee.unicamp.br

Resumo

Este artigo descreve um estudo comparativo de métodos heurísticos para o problema de alocação ótima de recursos para manutenção de redes de distribuição de energia elétrica. O modelo matemático do problema representa os principais componentes das redes, suas inter-relações operacionais, suas confiabilidades e mudanças de condições devido a ações de manutenções. O objetivo do modelo de otimização é reduzir os custos de manutenção sob restrições de operação com determinados níveis de confiabilidade, ao longo de um horizonte de planejamento. São apresentados três métodos heurísticos híbridos, que utilizam buscas em espaços de soluções, com articulações de *Busca em Profundidade*, *Busca em Largura* e *Simulated Annealing*. Um estudo de caso elaborado compara os resultados obtidos pelos métodos desenvolvidos.

PALAVRAS-CHAVE: otimização de manutenções, redes de distribuição de energia elétrica, otimização em espaços de soluções.

Abstract

This paper describes a comparison study of heuristic methods for optimal allocation of resources for the maintenance of electric power distribution networks. The mathematical model represents the main components of the networks, their operational interrelationships, their reliabilities and the changes in condition due to maintenance procedures. The objective of the optimization model is the reduction of maintenance costs under operations constraints with certain levels of reliability, during a given planning period. Three hybrid heuristics methods are presented, based on the *depth-first* and *breadth-first* and *simulated annealing* solutions space searches. A case study realized compare the results obtained by the hybrid heuristics methods developed.

KEY-WORDS: maintenance optimization, electric power distribution networks, solution space optimization.

1 Introdução

Este artigo descreve um estudo comparativo entre métodos de buscas no espaço de soluções para problema de alocação ótima de recursos para manutenção de sistemas de distribuição de energia elétrica. O problema é representado através de modelo matemático considerando os componentes das redes, suas inter-relações para operação das redes, sua confiabilidade e mudanças por ações de manutenções. O objetivo do processo de otimização é reduzir os custos de manutenção sob restrições de níveis mínimos de confiabilidade, ao longo de um horizonte de planejamento.

Vários métodos foram descritos na literatura para o problema de alocação de recursos de manutenção. Alguns apresentam aplicações mono-objetivo, os quais são destacados a seguir. Endrenyi, Anders & Leite da Silva (1998) descrevem o impacto na confiabilidade do sistema de distribuição do processo de deteriorização dos elementos. Os autores apresentam uma formulação para o cálculo do custo de várias alternativas de políticas de manutenção, identificando as melhores através de método Markoviano para avaliação do impacto das inspeções na confiabilidade do sistema. Kuntz, Christie & Venkata (2002) utilizam redes neurais para previsão das taxas de falhas devido a interrupções ocasionadas pela vegetação existente ao longo dos alimentadores. As técnicas *simulated annealing*, algoritmo genético, busca tabu e combinações dessas técnicas foram utilizadas para resolver o problema de definição do cronograma de poda de árvore para redução do custo total da confiabilidade do sistema. Janjic & Popovic (2007) propuseram uma abordagem para determinar o plano ótimo de ações de manutenção. O modelo de transição de soluções apoiou-se em uma árvore de decisões que representam os possíveis cenários anuais de manutenções preventivas. Sittithumwat, Soudi & Tomsovic (2004) propuseram uma metodologia usando multiplicadores de taxa de falha para três níveis de manutenção: intensiva, mínima e nenhuma manutenção. As melhores políticas de manutenção são encontradas através da solução de um problema de programação linear binária. Reis (2007) discute o problema de redução dos custos de manutenção, utilizando duas abordagens de meta-heurísticas, o método GRASP (*greedy randomized adaptive search procedure*) e o Algoritmo Genético Híbrido, com o objetivo de minimizar os custos de manutenção, restritos por um nível mínimo de confiabilidade do sistema.

2 Modelo Matemático para o Problema de Manutenção

Os sistemas de distribuição de energia elétrica (SDDE) são definidos pelos circuitos elétricos que partem das subestações até seus clientes (consumidores de energia elétrica). Como sugerem Sittithumwat *et al.* (2004) e Reis (2007), a rede pode ser dividida por sessões, onde suas fronteiras são caracterizadas pelos equipamentos de proteção (disjuntores, chaves-fusíveis e religadores), que buscam evitar a propagação de falhas ao longo do sistema de distribuição de energia elétrica. Além disso, esses sistemas são constituídos de equipamentos para manobras (chaves), correção de carga (capacitores) e transformação (transformadores de distribuição), além dos alimentadores, condutores e da infra-estrutura associada aos postes, cruzetas e amarrações.

Em redes de distribuição radiais o equipamento de proteção é acionado quando qualquer outro equipamento de uma seção falhar, o que causa uma interrupção na distribuição da energia elétrica. Portanto, seções mais próximas dos alimentadores são mais importantes em relação a confiabilidade do sistema devido ao número maior de consumidores atingidos pela falha.

2.1 Formulação Matemática

O modelo de otimização proposto por Bacalhau (2009), caracteriza-se por uma função objetivo para minimizar os custos de manutenções corretivas e preventivas e pela restrição do índice de confiabilidade do sistema, definido como *frequência equivalente de interrupções por unidade*

consumidora (FEC). O FEC para um período de planejamento pode ser calculado pela equação:

$$FEC^t = \frac{\sum_{s \in S} \lambda_s^t N_s}{N_T}, \quad (1)$$

sendo S o conjunto de todas as seções do sistema, λ_s^t a taxa de falha da seção s no período t , N_s o número de clientes na seção s e N_T o número total de clientes da rede.

A taxa de falha da seção s no período t , λ_s^t , na Equação 1, pode ser calculada pelas equações:

$$\sum_{n \in N_{k_e}} x_{en}^t = 1, \quad (2)$$

$$\lambda_e^t = \lambda_e^{(t-1)} \sum_{n \in N_{k_e}} \delta_{k_e n} x_{en}^t \quad (3)$$

$$\lambda_s^t = \lambda_s + \sum_{e \in E_s} \lambda_e^t, \quad (4)$$

sendo λ_e^t a taxa de falha do equipamento e no período t , $\lambda_e^{(t-1)}$ a taxa de falha do equipamento e no ano anterior ou a taxa de falha inicial do equipamento e ($t = 1$), N_{k_e} o conjunto de todas as ações preventivas (incluindo a ação *sem manutenção*) que podem ser escolhidas, $\delta_{k_e n}$ o multiplicador de taxa de falha do equipamento de tipo k_e para a ação de nível n que representa o envelhecimento do equipamento no período de planejamento (Siqueira 2005) e x_{en}^t a variável booleana de decisão que indica se o equipamento e sofreu ($x_{en}^t = 1$) ou não ($x_{en}^t = 0$) uma manutenção de nível n no período t . Na Equação 4, λ_s é a taxa de falha base da seção s representada por uma constante associada a uma parcela da taxa de falha de fatores não incorporados no modelo e E_s é conjunto que contém todos os equipamentos e presentes na Seção s . Têm-se vários níveis de manutenção para cada equipamento, isso implica que existirá um $\delta_{k_e n}$ diferente para cada ação, determinando a taxa de falha em cada ano do período de um planejamento.

As ações de manutenção são as variáveis de decisão do modelo, ou seja, os níveis de manutenção aplicado a cada equipamento, definidos como *com manutenção preventiva* ou *sem manutenção preventiva*. Sendo assim, a representação do problema matemático de otimização pode ser descrita como:

$$\min_{x_{en}^t} \sum_{t=1}^{HP} \left\{ \sum_{e \in E} \left[\sum_{n \in N_{k_e}} (p_{k_e n} x_{en}^t) + \lambda_e^t c_{k_e} \right] \times \alpha_t \right\} \quad (5)$$

$$s.a.: \quad FEC^t \leq FEC_{perm} \quad \forall t = 1, \dots, HP, \quad (6)$$

sendo E o conjunto que contém todos equipamentos sujeitos à manutenção, FEC_{perm} o valor máximo permitido para o FEC, $p_{k_e n}$ o custo da ação preventiva de nível n no equipamento de tipo k_e , c_{k_e} o custo da manutenção corretiva do equipamento de tipo k_e e α_t um parâmetro associado a cada intervalo de tempo.

O parâmetro α_t equilibra a distribuição das ações de manutenção ao longo dos intervalos do horizonte de planejamento (HP) e é definido como o valor presente dos investimentos:

$$\alpha_t = \left(\frac{1}{1+j} \right)^t, \quad (7)$$

sendo t o período e j a taxa de juros aplicada ao investimento.

3 Estratégias de Buscas em Espaços de Soluções

O problema de alocação ótima de recursos de manutenção para redes de distribuição de energia elétrica pode ser abordado por uma busca em espaço de soluções. Seja $S_{m \times n}$ uma matriz na qual m representa o número de anos definidos para o horizonte de planejamento em um dado problema de alocação ótima de recurso de manutenção e n o número de equipamentos de uma rede. A matriz S representa um estado do problema, caracterizando o conjunto de ações de manutenção. Sendo assim, S_0 define a solução inicial para o problema. Por exemplo, para uma rede de 30 equipamentos e horizonte de planejamento de três anos, tem-se:

$$S_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix},$$

Em S_0 as ações de manutenção foram escolhidas aleatoriamente, sendo que 1 representa a ação *com manutenção preventiva* e 0 a ação *sem manutenção preventiva*.

Dado o espaço de soluções de tamanho $2^{(n*HP)}$, define-se uma sequência de ações que buscam a melhor estratégia de alocação de recursos de manutenção. Essas ações determinam a transição entre a solução atual S e a solução seguinte S' ($S \rightarrow S'$).

Como estratégia de busca foram desenvolvidas três métodos heurísticos híbridos (Bacalhau 2009), apoiados em combinações da busca em profundidade (Pearl 1984), busca em largura (Pearl 1984) e o método *Simulated Annealing* (Michalewicz & Fogel 2000).

3.1 Busca em Profundidade

Na busca em profundidade, a prioridade é explorar o nó de nível mais alto da árvore de busca (Pearl 1984).

A estratégia da busca em profundidade desenvolvida possui algumas características distintas. O procedimento de escolha do próximo nó a ser explorado é dado pelo valor da função objetivo do problema. Além disso, o procedimento de expansão do nó é dado por regras de transições heurísticas.

3.2 Busca em Largura

Na busca em largura todos os nós do nível atual são expandidos antes de qualquer nó do nível seguinte (Russell & Norvig 2003). A estratégia segue expandindo todos os nós desse nível seguinte, e depois os nós dos níveis sucessores a esse nível, e assim por diante.

Como na busca em profundidade proposta, a busca em largura desenvolvida também possui características de distintas. O procedimento de escolha dos nós a serem explorados a cada nível é dado pelo valor da função objetivo do problema, e ainda, o procedimento de expansão do nó também é dado por regras de transições heurísticas.

3.3 Simulated Annealing

O *Simulated Annealing* foi baseado no procedimento de Metropolis, Rosenbluth, Rosenbluth, Teller & Teller (1953), e sua estratégia foi proposta por Kirkpatrick, Gerlatt & Vecchi (1983) como uma determinação de estados de equilíbrio de uma coleção de átomos a uma dada temperatura.

A estratégia de busca no espaço de soluções é apoiada na busca *Hill Climbing* (Pearl 1984). Porém, para movimentos considerados inferiores (superiores) ao valor da solução atual, efetua-se

um cálculo de probabilidade ($p < 1$) que determinará se esse movimento poderá ser aceito pelo procedimento. A probabilidade p é calculada da seguinte forma:

$$p^t = 1 / (1 + (\exp((val(s) - val(s')) / T^t))) , \quad (8)$$

sendo s a solução atual, s' a solução seguinte, $val(s)$ o valor da função objetivo para a solução s , $val(s')$ o valor da função objetivo para a solução s' e T a variável 'temperatura'.

A probabilidade p depende da qualidade relativa entre os valores da função objetivo das soluções e da variável T . E ainda, o valor da variável T diminui linearmente a cada cálculo de probabilidade efetuado (resfriamento da temperatura), como ilustra a seguinte equação:

$$T^{t+1} = r.T^t , \quad (9)$$

sendo o primeiro T^t um parâmetro definido pelo método e r uma constante definida no intervalo $[0, 1]$.

4 Otimização em Espaços de Soluções para o Problema de Manutenção

Os métodos heurísticos híbridos desenvolvidos combinam o método de *Simulated Annealing* aos procedimentos de busca em profundidade e busca em largura construídos (Bacalhau 2009).

- 1- Procedimento de Busca em Profundidade procedida do método *Simulated Annealing* (BPS)
- 2- Procedimento de Busca em Largura procedida do método *Simulated Annealing* (BLS)
- 3- Procedimento baseado apenas no método *Simulated Annealing* (BSA)

Nesses métodos diversos tipos de operadores de transição são explorados, além da elaboração de uma heurística construtiva para a construção da primeira solução. Esses operadores definem qual tipo de ação programada irá atuar durante o movimento de transição das soluções, e são definidos da seguinte forma:

$$TipoDeAçãoEscolhida(S, S'),$$

sendo S a solução atual e S' a solução que será obtida pelo movimento.

A Heurística Construtiva (HC) presente nos métodos, tem o objetivo de obter a solução inicial para o algoritmo, assim como diminuir o número de iterações realizados pela busca.

Nos métodos 1 e 2, as buscas em profundidade e largura têm a função de ser a primeira exploração no espaço de soluções, guiando a solução inicial para uma solução melhorada. O método *Simulated Annealing* nesses dois casos funciona como um pós-processo, utilizando a solução obtida no Processo Inicial como solução inicial, e realizando a procura por melhores soluções guiado pelos operadores já executados e pelos novos operadores de transição dotados de informações sobre o problema. No terceiro método, o *Simulated Annealing* é o único procedimento realizado, sendo a solução inicial a solução encontrada pela HC.

4.1 BPS

O método heurístico híbrido BPS é composto por três processamentos: heurística construtiva, processo inicial (busca em profundidade) e processo final (*simulated annealing*).

A HC é constituída por funções de custo/benefício (Bacalhau 2009). Essas funções são aplicadas aos valores de custo de manutenção por equipamento e ao FEC máximo escolhido, determinando as ações de manutenção que compõem a solução inicial mais apropriada ao problema.

O Processo Inicial de busca em profundidade visa encontrar boas soluções para o algoritmo através de processos de aplicação dos operadores de transição de soluções construídos com base no investimento e na aleatoriedade. Esses operadores de transição de soluções são inseridos no contexto de elaboração dos nós filhos.

O Processo Final de *simulated annealing* é iniciado a partir da solução final encontrada pelo Processo Inicial. Seus operadores de transição de soluções possuem características diferentes, explorando informações sobre o problema. Porém, o foco do Processo Final é a escolha probabilística de soluções encontradas em movimentos de transição considerados inferiores durante a execução do algoritmo. Critérios de parada constituídos pelo número de iterações, ou pela ineficiência dos movimentos executados determinam o fim do Processo.

O método BPS é resumido no Pseudo-código 1 ilustrado na Fig.1.

Pseudo-código 1 BPS (S)

```

1: Heurística Construtiva → (S)
2: Processo Inicial - Busca em Profundidade (S) → (S')
3: Repita (TipoDeAçãoEscolhida(S,S'))
4:   Se S' é válida então
5:     S ← S'
6:   Fim Se
7:   Até que (critérios de parada)
8: Processo Final(S) → (S')
9: Repita (tipodeaçãoescolhida2(S,S'))
10:  Se S' é válida então
11:    S ← S'
12:  Senão
13:    Calcula-se P
14:    Se P aceitável então
15:      S ← S'
16:    Fim Se
17:  Fim Se
18:  Até que (critérios de parada)
Retorna: S

```

Figura 1: Pseudo-código 1

4.2 BLS

O método heurístico híbrido BLS possui a mesma estrutura de processamento do método BPS, com uma heurística construtiva para a solução inicial, um Processo Inicial de busca em largura e um Processo Final apoiado no método *simulated annealing*. A HC é composta com as mesmas funções de custo/benefício usadas no BPS para a escolha das ações de manutenção que determinam a solução inicial apropriada.

No Processo Inicial de busca em largura, os operadores de transição de soluções são os mesmos aplicados no método BPS. A aplicação desses operadores é dada no contexto de elaboração dos nós inseridos a cada nível de exploração da busca.

O Processo Final de *simulated annealing* é iniciado a partir da solução final encontrada pelo Processo Inicial. Os operados de transição de soluções são os mesmo executados no Processo Final do método BPS, seguindo as características de movimentos com informação sobre o problema. Desse modo, escolha de soluções apoiadas no cálculo da probabilidade p também será o foco do Processo.

As principais diferenças dentre os métodos BPS e BLS são os tipo de buscas no espaços de soluções e os critérios de parada do Processo Inicial. Além de avaliar a dinâmica dos valores das soluções encontradas e o número de iterações, a busca em largura também realiza um corte no número de elementos presentes nos níveis seguintes, reduzindo substancialmente o número de iterações.

O método BLS é resumido no Pseudo-código 2 ilustrado na Fig.2.

Pseudo-código 2 BLS (S)

```

1: Heurística Construtiva → (S)
2: Processo Inicial - Busca em Largura (S) → (S')
3: Repita (TipoDeAçãoEscolhida(S,S'))
4:   Se S' é válida então
5:     S ← S'
6:   Fim Se
7: Até que (critérios de parada)
8: Processo Final(S) → (S')
9: Repita (tipodeaçãoescolhida2(S,S'))
10:  Se S' é válida então
11:    S ← S'
12:  Senão
13:    Calcula-se P
14:    Se P aceitável então
15:      S ← S'
16:    Fim Se
17:  Fim Se
18: Até que (critérios de parada)
Retorna: S

```

Figura 2: Pseudo-código 2

4.3 BSA

O método heurístico híbrido BSA, semelhante aos métodos BPS e BLS, é composto de uma heurística construtiva para a elaboração da primeira solução. A construção da solução inicial pela HC segue a mesma estrutura das heurísticas executadas nos métodos BPS e BLS, apoiando-se em funções custo/benefício associadas aos valores de custo de manutenção e a restrição de qualidade do sistema (FEC).

A partir da solução inicial, o método de *simulated annealing* é iniciado composto por operadores de transição de soluções e critérios de parada iguais aos utilizados nos Processos Finais executados nos métodos anteriores. E ainda, o cálculo de probabilidade p é a estratégia utilizada pelo método para tratar movimentos dados pelos operadores, que encontram soluções consideradas inferiores ao valor da solução atual.

O método BSA é ilustrado no pseudo-código 3 através da Fig.3.

5 Estudo de Casos

A configuração de rede utilizada nesse estudo de caso é uma rede radial desenvolvida por Sittithumwat et al. (2004) e adaptada por Reis (2007). Sua estrutura é dispostas por seções, como ilustra a Fig.4.

Pseudo-código 3 BSA (S)

- 1: **Heurística Construtiva** → (S)
 - 2: **Processo - Simulated Annealing (S)** → (S')
 - 3: **Repita** (*TipoDeAçãoEscolhida2(S,S')*)
 - 4: **Se** S' é válida **então**
 - 5: $S \leftarrow S'$
 - 6: **Senão**
 - 7: Calcula-se **P**
 - 8: **Se** P aceitável **então**
 - 9: $S \leftarrow S'$
 - 10: **Fim Se**
 - 11: **Fim Se**
 - 12: **Até que** (*critérios de parada*)
- Retorna:** S

Figura 3: Pseudo-código 3

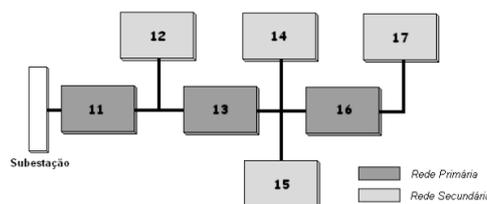


Figura 4: Rede de Referência

Dois sistemas de rede de distribuição de energia são construídos para essa Rede de Referência. O primeiro caso é a rede de 30 equipamentos distribuídos em sete seções, e o segundo caso é uma ampliação dessa rede com 76 equipamentos distribuídos nas mesmas sete seções. Nos dois casos, tem-se dez tipos diferentes de equipamentos como ilustra a Tabela 1. A Tabela 1 apresenta todos os equipamentos com seus respectivos valores de Custo de Manutenção Corretiva (CMC), Custo de Manutenção Preventiva (CMP), Multiplicador das Taxas de Falhas para a ação de Manutenção Preventiva (Mtx MP), Custo Sem Manutenção (CSM), Multiplicador das Taxas de Falhas para a ação Sem Manutenção (Mtx SM) e Taxas de Falhas Iniciais (TF Inicial).

Tipo	CMC (R\$ x 1000)	CMP (R\$ x 1000)	Mtx MP	CSM (R\$ x 1000)	Mtx SM	TF Inicial (falha/ano)
Cabo	0.06	0.03	0.92	0	1.08	0.02
Infraestrutura 1	0.94	0.47	0.79	0	1.26	0.05
Infraestrutura 2	0.94	0.47	0.79	0	1.26	0.05
Poste 1	14.5	7.25	0.69	0	1.2	0.001
Poste 2	14.5	7.25	0.69	0	1.2	0.001
Regulador	16	8	0.89	0	1.12	0.029
Religador	1.2	0.6	0.91	0	1.28	0.015
Poda de Rede 1	2.05	1.025	0.95	0	1.51	0.05
Poda de Rede 2	1.05	0.525	0.95	0	1.51	0.05
Transformador	1.692	0.846	0.95	0	1.51	0.01

Tabela 1: Tipos de Equipamentos

O objetivo desse experimento é desenvolver um estudo comparativo entre os três métodos

heurísticos híbridos apresentados. Para a execução dos métodos alguns parâmetros foram ajustados, tais como o valor inicial de ‘temperatura’ ($T = 1$) e o valor da constante $r = 0.95$ a qual determina o decréscimo linear da variável T . Outro parâmetro determinado foi o valor de probabilidade $p = 0.65$.

Os algoritmos foram executados cinco vezes e os valores da melhor solução encontrada, a média das soluções e o tempo médio de execução são apresentados na Tabela 2. Os valores em negrito são os melhores resultados comparando os métodos BPS, BLS e BSA.

Caso I (HP, FEC e TX)	BPS			BLS			BSA		
	Melhor Solução R\$ \times 1000	Solução Média R\$ \times 1000	Tempo Médio seg.[s]	Melhor Solução R\$ \times 1000	Solução Média R\$ \times 1000	Tempo Médio seg.[s]	Melhor Solução R\$ \times 1000	Solução Média R\$ \times 1000	Tempo Médio seg.[s]
3, 0.35 e 10%	24,6275	24,7779	2,94	24,6275	24,6757	3,14	24,7292	25,3808	1,73
3, 0.35 e 15%	23,6826	23,9155	2,50	23,6826	24,0853	2,08	24,0080	24,2913	1,67
3, 0.55 e 10%	14,2355	14,5309	4,20	14,2355	14,5475	2,51	14,2355	14,4881	1,92
3, 0.55 e 15%	13,4375	13,5322	4,48	13,4375	13,7580	1,96	13,5673	13,9389	3,46
3, 0.95 e 10%	7,2746	7,2746	0,82	7,2746	7,2746	0,55	8,1274	8,1274	0,16
3, 0.95 e 15%	6,9220	6,9220	0,89	6,9220	6,9220	0,50	8,1274	8,1274	0,09
5, 0.35 e 10%	41,0824	42,3023	45,17	42,3874	43,0731	63,98	42,5013	42,9120	61,77
5, 0.35 e 15%	38,9755	39,1199	48,37	37,5377	38,7686	60,00	38,9231	40,2919	45,45
5, 0.55 e 10%	29,5806	29,8049	39,15	29,6678	29,8455	42,52	29,7891	30,0033	38,29
5, 0.55 e 15%	26,7209	26,8040	34,33	26,6136	26,8744	37,90	26,6581	26,8187	44,65
5, 1.82 e 10%	15,5581	15,5581	2,10	15,5581	15,5581	2,91	15,5581	16,4003	0,53
5, 1.82 e 15%	13,9953	13,9953	2,22	13,9953	13,9953	3,89	13,9953	16,3047	0,20
Caso II (HP, FEC e TX)									
3, 0.72 e 10%	119,6642	120,4992	609,82	120,3632	120,9666	783,45	128,1013	136,5191	614,67
3, 0.72 e 15%	119,5900	120,0455	750,56	119,5642	119,9177	688,56	125,5708	129,3597	789,29
3, 1.00 e 10%	32,0938	32,3535	212,29	32,1630	32,3783	315,34	32,3757	32,3905	422,61
3, 1.00 e 15%	30,4662	30,5107	180,68	30,4719	30,5135	137,22	30,5189	30,5442	227,25
3, 1.82 e 10%	14,4568	14,4568	13,53	14,4568	14,4568	20,29	16,8962	16,8962	0,08
3, 1.82 e 15%	15,1706	15,1706	16,53	15,1706	15,1706	25,20	16,8962	16,8962	0,08

Tabela 2: Comparação dos resultados

A Tabela 2 ilustra a aplicação dos métodos aos dois casos de configuração de rede citados. No Caso I os algoritmos são executados variando o Horizonte de Planejamento ($HP = 3$ e $HP = 5$), o FEC (0,35, 0,55 e 0,95 para $HP = 3$ e 0,35, 0,55 e 1,82 para $HP = 5$), com taxa de juros anual (10% e 15%). No Caso II apenas o FEC (0,72, 1,00 e 1,82) e a taxa de juros anual (10% e 15%) variam, mantendo o Horizonte de Planejamento fixo ($HP = 3$).

Em uma análise superficial, pode-se observar que o método BPS obteve o melhor desempenho quanto ao problema de alocação de recursos. Porém, em uma análise mais detalhada, percebe-se que a medida em que o número de instâncias crescem, o método BPS apresenta uma certa dificuldade para cenários onde a restrição foi mais rigorosa. Pode-se notar também que, essa dificuldade nos casos I para $HP = 5$, $FEC = 0.35$ e $Taxa de Juros = 15\%$, e II para $HP = 3$, $FEC = 0.72$ e $Taxa de Juros = 15\%$.

Nota-se pelos valores de soluções obtidos pelos métodos que o uso dos Processos Iniciais são essenciais para o direcionamento das soluções. Em quase todos os casos o método BSA recai em um ótimo local, justificando com base nos critérios de parada construídos (produtividade do algoritmo), o tempo médio de processamento bem menor.

O método BLS também se destaca nesse estudo comparativo. Ele tem um bom desempenho em instâncias menores, com valores de tempo computacional médio geralmente melhores em relação aos valores de tempo computacional médio produzidos pelo método BPS. Em instâncias de maior porte com restrições mais rigorosas, tanto em relação ao FEC quanto à taxa de juros anuais, o método BLS obtém os melhores resultados quanto ao valores de melhor solução e média das soluções. Contudo, os valores de tempo médio aumentam significativamente em alguns casos. Essa análise reforça a ideia de corte nos números de soluções na estratégia de transição do método de

busca em largura implementado.

Por fim, deve-se ressaltar o desempenho do método BPS quanto à análise dos valores médios de soluções obtidos. Apresentou os melhores valores médios de soluções na maioria dos casos, mostrando que o algoritmo desenvolvido foi o mais robusto.

6 Conclusão

Este artigo teve como objetivo apresentar um estudo comparativo entre métodos de busca em espaços de soluções para o problema de alocação ótima de recursos para manutenção em redes de distribuição de energia elétrica. O trabalho de Bacalhau (2009) é utilizado como a principal referência para a apresentação dos métodos e das configurações de redes abordadas no estudo de caso.

Apresentou-se métodos heurísticos híbridos desenvolvidos à partir de uma combinação de procedimentos de busca em espaço de soluções, utilizando a busca em profundidade, busca em largura e *simulated annealing*. Esses métodos foram compostos por procedimentos construtivos guiados por uma função de custo/benefício e operadores de transição de soluções específicos para o problema estudado que incorporam conhecimento sobre o problema, com o objetivo de alcançar regiões promissoras do espaço de soluções.

Realizou-se um estudo de casos para comparar o desempenho dos três métodos desenvolvidos usando duas configurações de rede. Destacou-se através da análise desses resultados, o bom desempenho do método BPS na maioria dos casos, e o desempenho do método BLS em redes de maior porte com restrições de qualidade mais rigorosas.

Conclui-se que utilização da busca em profundidade e da busca em largura como um pré-processamento para o algoritmo do método *simulated annealing* foi determinante para os bons resultados obtidos. Apesar dos valores de tempo médio relativamente maiores, a diferença entre os valores das melhores soluções e soluções médias encontrados é significativa.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da CAPES e CNPq.

Referências

- Bacalhau, E. T. (2009). *Metaheurísticas para alocação ótima de recursos de manutenção em redes de distribuição de energia elétrica*, Mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP - Brazil.
- Endrenyi, J., Anders, G. & Leite da Silva, A. (1998). Probabilistic evaluation of the effect of maintenance on reliability. an application, *IEEE Transactions on Power Systems* **13**(2): 576–583.
- Janjic, A. & Popovic, D. (2007). Selective maintenance schedule of distribution networks based on risk management approach, *IEEE Transactions on Power Systems* **22**(2): 597–604.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D. J. & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing, *Science* **220**: 671–680.
- Kuntz, P., Christie, R. & Venkata, S. (2002). Optimal vegetation maintenance scheduling of overhead electric power distribution systems, *IEEE Transactions on Power Delivery* **17**(4): 1164–1169.

- Metropolis, N., Rosenbluth, A., Rosenbluth, M. N., Teller, A. & Teller, E. (1953). Equations of state calculations by fast computing machines, *Journal of Chemical Physics* **21**: 1087–1092.
- Michalewicz, Z. & Fogel, D. B. (2000). *How to Solve it*, Spring-Verlag, New York.
- Pearl, J. (1984). *Intelligent Search Strategies for Computer Problem Solving*, Addison-Wesley Publishing Company., Los Angeles, California, U.S.A.
- Reis, P. A. (2007). *Otimização baseada em confiabilidade de planos de manutenção de sistemas de distribuição de energia elétrica*, Mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP - Brazil.
- Russell, S. & Norvig, P. (2003). *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, 2nd edn, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Siqueira, I. P. (2005). *Manutenção Centrada na Confiabilidade: Manual de Implementação*, Qualitymark Editora LTDA., Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Sittithumwat, A., Soudi, F. & Tomsovic, K. (2004). Optimal allocation of distribution maintenance resources with limited information, *Electric Power Systems Research* **68**: 208 – 220.