

Avaliação de uma Metodologia para Restabelecimento de Energia a partir de Simulações Computacionais em um Sistema de Distribuição Real de Grande Porte

Marcos H. M. Camillo*, Marcel E. V. Romero*, Rodrigo Z. Fanucchi*, Telma W. de Lima, Leandro T. Marques**, A. B. C. Delbem** e João B. A. London Jr.**

* COPEL Distribuição S/A - Londrina, Brasil – 86.010-220

(Tel: 55 (43) 3293-2000; e-mail: marcos.camillo@copel.com, marcel.romero@copel.com, rodrigo.fanucchi@copel.com).

** Universidade de São Paulo – USP - São Carlos, Brasil – 13.560-250

(Tel 55 (16) 3373-9366 R.218; telma@inf.ufg.br, leandrotolomeu@gmail.com, acbd@icmc.usp.br e jbalj@sc.usp.br)

Abstract: Recentemente desenvolveu-se uma metodologia que permite a obtenção de planos de restabelecimento de energia em sistemas de distribuição de grande porte. Essa metodologia é baseada em Algoritmos Evolutivos Multi-objetivo e faz uso da chamada representação Nó-Profundidade para representar computacionalmente a topologia elétrica dos sistemas de distribuição. O objetivo deste artigo é avaliar a aplicação dessa metodologia em um sistema real de grande porte. Para isso, este artigo apresenta e analisa os resultados de diversas simulações da aplicação dessa metodologia para obtenção de planos de restabelecimento de energia no sistema de distribuição da cidade de Londrina, localizada no estado do Paraná, no Brasil. Esse sistema está sob concessão da Companhia Paranaense de Energia (COPEL) e possui 30.156 barras e 2.910 chaves. Vale destacar que foram simuladas a ocorrência de faltas permanentes simples e múltiplas.

Palavras-Chave: Sistemas de distribuição de grande porte, restabelecimento de energia elétrica, algoritmo evolutivo multiobjetivo, otimização em sistemas elétricos, reconfiguração de redes.

1. INTRODUÇÃO

Desenvolver um sistema de distribuição de energia confiável é certamente um desafio inerente aos profissionais do setor elétrico. No entanto, estes sistemas estão sujeitos a falhas e, sendo assim, o rápido restabelecimento traz a satisfação do cliente e reduz as compensações pagas pelas concessionárias de energia. Esse processo de restabelecimento de energia do circuito alimentador, quando afetado por uma ou múltiplas faltas permanentes, tem como ferramentas a utilização dos recursos computacionais existentes e equipamentos instalados no Sistema de Distribuição Radial (SDR) de forma a buscar a melhor forma de restabelecer a maior parte do sistema possível e direcionar corretamente as equipes para inspeção do trecho ainda desligado. Esse processo, apesar das normas técnicas existentes nas concessionárias e que auxiliam na análise, baseia-se muito ainda nas características pessoais de cada operador do Centro de Operação da Distribuição (COD). Isso se deve, principalmente, a dificuldade de visualização de todas as variáveis envolvidas para a obtenção da solução, a quantidade de soluções possíveis e ao tempo de obtenção, pelo ser humano, de uma solução factível.

Baseado no exposto torna-se de extrema importância a existência de um Plano de Restabelecimento de Energia (PRE), que deve ser obtido em um curto intervalo de tempo, possibilitando a aplicação em tempo real. Além disso, o mesmo deve atender aos seguintes objetivos:

- i. Minimização do número de manobras;
- ii. Redução do número de consumidores interrompidos;

Contudo, estes objetivos estão sujeitos às seguintes restrições:

- iii. Ausência de sobrecarga em equipamentos de rede e subestações;
- iv. Manutenção dos níveis de tensão dentro dos limites exigidos pela legislação em cada país;
- v. Manutenção da estrutura radial do sistema.

Entre as técnicas propostas para a obtenção de PREs em sistemas de distribuição reais de grande porte, destacam-se as baseadas em algoritmos evolutivos multiobjetivos, entre elas a metodologia denominada Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo em Tabelas (AEMT). Nesse método, as melhores configurações do sistema (denotadas de indivíduos) são armazenadas em tabelas conforme seu desempenho para uma determinada função objetivo. Outro aspecto importante desse método refere-se a representação elétrica das topologias da rede através da estrutura de dados chamada Representação Nó-Profundidade (RNP). Esta representação elimina a possibilidade de geração de configurações não factíveis eletricamente. Seguindo essa mesma linha de pesquisa, em (Sanchez n.d.) é apresentada a metodologia AEMT-H (Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo em Tabelas com Heurística). Nessa metodologia foram realizadas algumas melhorias no AEMT utilizando o conceito de dominância de Pareto, possibilitando utilizar uma heurística de forma a priorizar manobras nos alimentadores com maiores queda de tensão e carregamento.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho é avaliar a metodologia AEMT-H para obtenção de PREs quando da ocorrência de faltas simples e múltiplas em um sistema de distribuição real de grande porte. Para isso foi utilizado o sistema de distribuição da cidade de Londrina-Paraná-Brasil, que pertence à área de concessão da Companhia Paranaense de Energia (COPEL).

2. RESTABELECIMENTO DA ENERGIA EM SDR

A ocorrência de interrupções em redes de distribuição, apesar de indesejável, é uma situação comum devido a diversos motivos como obras de expansão, intervenções de manutenção preventiva ou pela atuação de algum elemento de proteção em decorrência de faltas permanentes. Em redes de distribuição, os alimentadores possuem uma topologia radial onde blocos de carga são separados por chaves que operam nos estados normalmente aberta (NA) e normalmente fechada (NF). Dessa forma, torna-se possível a reconfiguração de redes quando da ocorrência de uma falta permanente em determinado trecho do alimentador através da alteração dos estados de determinadas chaves. Essa reconfiguração permite tanto a transferência de carga entre alimentadores ou trechos de alimentadores, como o isolamento do trecho sob falta para atuação das equipes de campo na correção do problema.

Conforme citado, em função da complexidade das redes envolvidas e das múltiplas variáveis a serem analisadas, a determinação de um PRE para determinada situação não é simples. Desta forma, o problema de restabelecimento de energia consiste em determinar uma estratégia de controle, para restabelecer a energia às cargas que não estão nos setores defeituosos, mas que ficaram sem energia devido ao isolamento destes, respeitando os limites operacionais do sistema.

2.1. Representação de SDRs através de Grafos

A topologia elétrica de um SDR pode ser representada computacionalmente através de grafo. Nessa representação, os setores são representados como nós do grafo e as chaves pelas arestas que interligam as barras, sendo que as arestas em linhas cheias representam as chaves NF e as em linhas tracejadas representam as chaves NA. Na Fig. 1 é mostrado um exemplo de um SDR com quatro alimentadores.

2.2. A Representação Nó-profundidade

A RNP é baseada, em sua forma computacional, no conceito existente de caminhos e de profundidade do nó em um grafo (Delbem et al., 2004). Para a profundidade de um nó dentro de um grafo, considera-se a distância dada pelo número de nós existentes entre o mesmo e o nó raiz.

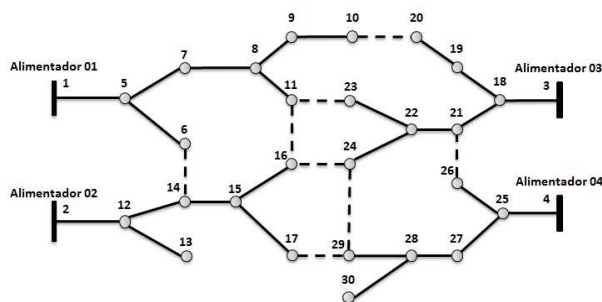
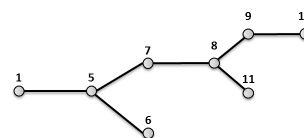


Fig. 1. SDR com quatro alimentadores.

Sendo assim, a representação através da RNP consiste de uma lista contendo os nós das árvores e suas respectivas profundidades. Essa lista é formada por pares do (n_i, p_i) , onde n_i é o nó da árvore e p_i a profundidade do nó. Na Fig. 2 é mostrado um exemplo de uma árvore de grafo e sua respectiva codificação nó-profundidade.



$$\begin{bmatrix} \text{Profundidade} \\ \text{Nó} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 & 2 & 3 & 4 & 4 & 5 \\ 1 & 5 & 6 & 7 & 8 & 11 & 9 & 10 \end{bmatrix}$$

Fig. 2. Árvore de um Grafo e sua RNP

2.3. Os Operadores das RNPs

Para a manipulação das RNPs possibilitando a obtenção de novas florestas são definidos dois operadores: PAO (“Preserve Ancestor Operator”) e CAO (“Change Ancestor Operator”).

No caso do PAO, há a necessidade de definição do ponto p indicando o local do corte na árvore T_{de} , que será a raiz da subárvore a ser transferida para a árvore T_{para} e o ponto a que indica o local onde a subárvore será “enxertada” (conectada) na árvore T_{para} . Já para o CAO, há a necessidade de definição, além de p e a , do novo nó raiz, chamado de r , pertencente a árvore T_{de} .

3. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROBLEMA

Para tratar computacionalmente o problema de restabelecimento de energia é proposta a formulação matemática apresentada em (1), desenvolvida com base naquelas apresentadas por (Santos et al., 2010) e por (Sanches et al., 2014).

$$\begin{aligned} & \text{Min. } \phi(G) \text{ e } \psi(G, G^0) \\ & \text{s.a: } Ax = b; X(G) \leq 1; B(G) \leq 1; V(G) \leq 1 \\ & \text{e } G \text{ ser uma floresta,} \end{aligned} \quad (1)$$

em que G é uma floresta de grafos representando uma configuração do SDR; $\phi(G)$ é o número de consumidores fora de serviço em uma configuração G ; $\psi(G, G^0)$ é o número de operações de chaveamento necessárias para se obter uma configuração G a partir da configuração G^0 , na

qual a área sob falta já está isolada; A é a matriz incidência de G ; x é o vetor de correntes de linha na configuração G ; b é um vetor contendo as correntes complexas nas barras de carga (com $b_i < 0$) e de passagem ($b_i = 0$) ou as injeções de corrente nas barras das SEs (com $b_i > 0$); $X(G)$ é o maior valor de carregamento da rede na configuração G , dado por $X(G) = \text{MAX}(x_j / \bar{x}_j)$, onde \bar{x}_j é um limitante superior de corrente, para cada corrente de linha x_j em uma linha j ; $B(G)$ é o maior valor de carregamento de SE na configuração G , dado pela maior razão $B(G) = \text{MAX}(b_s / \bar{b}_s)$, onde \bar{b}_s é um limitante superior para cada injeção de corrente b_s provida por uma SE s ; $V(G)$ é o maior valor de queda de tensão em uma configuração G , dado pelo maior valor de $V(G) = \text{MAX}(|v_s - v_k| / \delta)$, onde v_k é a magnitude de tensão, em p.u., na barra k , e v_s é a magnitude de tensão, em p.u., na barra da subestação s que alimenta a barra k , e δ é a máxima queda de tensão admissível (neste trabalho 10%, isto é, $\delta = 0,1$).

O valor da corrente x_j em cada linha j , bem como o valor da injeção de corrente b_s , em cada subestação s , e o valor da tensão v_k , em cada barra k , podem ser obtidos através de um fluxo de potência adequado para SDRs, tendo as cargas modeladas segundo um modelo de carga também adequado.

Para a utilização de AEs na resolução do problema de restabelecimento de energia, esta formulação pode ser apropriadamente reescrita por meio das seguintes considerações:

i) A utilização da RNP garante que as modificações realizadas na configuração da rede produzam uma nova configuração G , sendo esta última sempre uma configuração factível, ou seja, que mantém a radialidade do SD e com fornecimento de energia para todas as partes do sistema¹ (Mansour et al., 2010);

ii) $\phi(G) = 0$, uma vez que a RNP possui dois operadores que, por meio de poda e transferência de subárvores, geram exclusivamente florestas capazes de fornecer energia para todas as partes do SDR possíveis de serem conectadas por meio de chaves (Santos et al., 2010);

iii) Resolver $Ax = b$ utilizando um algoritmo de fluxo de Varredura Direta/Inversa com RNP (Santos et al., 2008), uma vez que a RNP organiza naturalmente todas as barras de cada configuração G segundo uma relação conhecida como “Terminal-Substation Order” (Kagan et al., 2005), necessária à execução do fluxo de potência;

iv) Tratar as restrições relacionadas a $X(G)$, $B(G)$ e $V(G)$ por meio de minimização do valor assumido por estes parâmetros.

Deste modo, a formulação matemática para o problema de restabelecimento de energia pode ser simplificada e reescrita conforme mostrado em (2).

$$\begin{aligned} & \text{Min. } \psi(G, G^0), X(G), B(G) e V(G) \\ & \text{s.a: Fluxo de potência com RNP,} \\ & \quad G \text{ ser uma floresta gerada pela RNP.} \end{aligned} \quad (2)$$

4. ALGORITMO EVOLUTIVO EM TABELAS COM HEURÍSTICA (AEMT-H)

Para definição dos PREs, neste artigo será utilizado o algoritmo denotado de AEMT-H. Este algoritmo, proposto em (Sanches n. d.), utiliza os conceitos dos Algoritmos Evolutivos Multi-objetivos (AEMOs), que são algoritmos de busca estocástica baseados em princípios de seleção natural e recombinação (Santos et al., 2010). O AEMT-H trabalha ainda com várias subpopulações em paralelo, onde os melhores indivíduos para cada característica do problema são armazenados em sua respectiva subpopulação (sendo cada subpopulação representada por uma tabela). Cada tabela armazena indivíduos de modo a otimizar (maximizar ou minimizar) as características selecionadas. Os novos indivíduos são gerados a partir de qualquer indivíduo de qualquer tabela através da aplicação dos operadores genéticos descritos na seção 2.3.

Para representar computacionalmente os SDRs o AEMT-H faz uso da RNP. Na avaliação de cada indivíduo o AEMT-H utiliza um algoritmo eficiente de fluxo de potência de Varredura Direta/Inversa do tipo Soma de Correntes, com as cargas modeladas pelo método de corrente constante e com RNP (Santos et al., 2010). Deste modo, são satisfeitas as duas restrições do problema, formulado e apresentado em (2).

Baseado no Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo em Tabelas (AEMT), o AEMT-H explora o espaço de objetivos usando o conceito de tabelas de subpopulações. Cada tabela de subpopulação armazena as melhores soluções encontradas de acordo com um objetivo, uma restrição ou uma função de agregação de objetivos e restrições. No entanto, o AEMT-H utiliza ainda os conceitos do “*Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm*” (NSGAI) nos quais são povoadas três tabelas obedecendo aos critérios de dominância de Pareto e utilizando o conceito de subpopulações “não-dominadas” (F_1 a F_3). Os indivíduos presentes na tabela de indivíduos da subpopulação com soluções “não-dominadas” F_1 são aqueles não dominados por nenhum outro indivíduo presente na população avaliada. Já os da tabela F_2 são aqueles dominados apenas pelos indivíduos de F_1 . Por fim, os da tabela de indivíduos da subpopulação com soluções “não-dominadas” F_3 são aqueles dominados apenas pelos indivíduos de $F_1 \cup F_2$.

O conteúdo de cada uma das quatorze tabelas numeradas é dado conforme a seguir:

- i. Tabelas associadas a cada objetivo e restrição:
 - (a) T_1 – indivíduos com menor $\gamma(G)$ encontrado;
 - (b) T_2 – indivíduos com menor $V(G)$ encontrado;
 - (c) T_3 – indivíduos com menor $X(G)$ encontrado;
 - (d) T_4 – indivíduos com menor $B(G)$ encontrado;

¹ Exclui-se a região afetada diretamente pela falta.

(e) T_5 – indivíduos com menor valor da função agregação encontrado, com o seguinte valor calculado para a função agregação:

$$f_{agg} = \psi(G, G^0) + \gamma(G) + \omega_x X(G) + \omega_b B(G) + \omega_v V(G) \quad (3)$$

onde $\psi(G, G^0)$, $X(G)$, $B(G)$ e $V(G)$ foram definidos na seção 3; $\gamma(G)$ é a perda ôhmica de potência, em p.u. da configuração G ; ω_x , ω_b e ω_v são penalizações para cada objetivo onde o valor adotado foi igual a 100 para cada uma delas.

ii. Tabelas associadas à quantidade de manobras, onde os indivíduos presentes na respectiva tabela são selecionados caso sua quantidade de manobras seja igual à da respectiva tabela e são ainda ranqueados através da comparação do valor da soma do percentual de carregamento da rede com o percentual da queda de tensão (os indivíduos com o menor valor desta soma permanecem na tabela):

(f) T_6 à T_{11} – 6 Tabelas com indivíduos compostos de 1 a 6 pares de manobras;

iii. Tabelas para incrementar a diversidade no espaço de objetivos organizadas por “ranking” de dominância usadas pelo NSGAI:

(g) T_{12} – indivíduos da subpopulação com soluções “não-dominadas” F_1 ;

(h) T_{13} – indivíduos da subpopulação com soluções “não-dominadas” F_2 ;

(i) T_{14} – indivíduos da subpopulação com soluções “não-dominadas” F_3 .

No aplicativo avaliado, as tabelas de 1 a 11 foram parametrizadas com uma quantidade de 5 indivíduos por tabela. A tabela 12 possui uma população de 20 indivíduos e as tabelas 13 e 14, 40 indivíduos cada.

A heurística aplicada ao AEMT-H visa a restrição dos circuitos alimentadores que participarão da etapa de escolha aleatória do alimentador para aplicação dos operadores da RNP. A ideia é a de restringir o espaço de busca e, consequentemente, obter soluções com menor número de manobras e que não violem os limites operacionais do sistema.

De acordo com a heurística proposta, cria-se uma lista ordenada de alimentadores para aplicação dos operadores RNP. O alimentador que possui a maior queda de tensão será o primeiro da lista, e assim por diante. Em caso de empate, o valor percentual do carregamento da rede é então verificado. Mantendo-se o empate a definição ocorre de maneira aleatória. Ao final, um percentual estipulado de alimentadores é eliminado da lista de opções, restando assim somente os “piores” com possibilidade de alteração em sua configuração.

5. TESTES E RESULTADOS

Para possibilitar a avaliação da metodologia foram executadas 50 simulações para faltas únicas e mais 50 para faltas múltiplas, dentro do SDR da cidade de Londrina-PR conforme topologia do ano de 2013. O sistema em questão possui 30.156 barras, 2.660 chaves “NF”, 250 chaves “NA” e atende um universo de mais de 231.000 consumidores ligados diretamente ao sistema de 13,8kV ou, após os transformadores de distribuição, nas tensões de 220V e 127V. Neste sistema estão presentes 6 subestações 138kV/13,8kV e 64 circuitos alimentadores, totalizando uma capacidade de transformação de energia de 541,7MVA.

O AEMT-H foi implementado utilizando um computador com processador Intel Core i7-3770, 12 GB de RAM, Sistema Operacional Linux distribuição Ubuntu 12.4 e GCC 4.4 com compilador de linguagem C. Os parâmetros utilizados para execução do AEMT-H foram os seguintes:

1. Número máximo de indivíduos gerados: $G_{MÁX} = 70.000$;
2. Queda máxima de tensão admissível: 10% em relação à tensão nominal da SE (13.800V);
3. Máximo Carregamento admissível: 100% da capacidade do condutor (definido como carregamento da rede) e do transformador (definido como carregamento da subestação);
4. Critério de Parada do Algoritmo: ter atingido o número máximo de indivíduos avaliados ($G_{MÁX}$).

5.1. Simulações para Falta Simples

Para realização dos testes considerando a ocorrência de uma falta simples no SDR de Londrina, inicialmente foi selecionado para aplicação do AEMT-H o setor I do alimentador 59, conforme mostrado na Fig. 3. O SDR presente na figura apresenta apenas alguns poucos setores do sistema completo.

A Tabela 1 sintetiza, considerando os melhores indivíduos presentes nas tabelas relacionadas aos objetivos e restrições de todas as 50 simulações realizadas, os resultados para perdas ôhmicas e para restrições operacionais, obtidos pelo AEMT-H no SDR de Londrina.

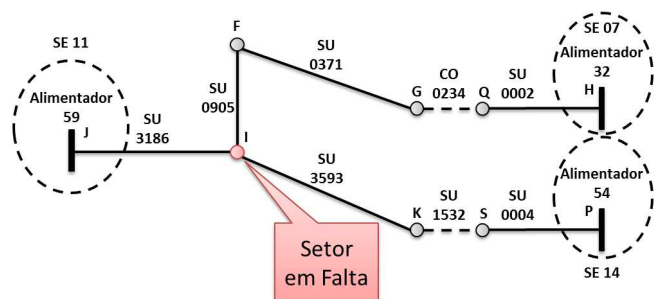


Fig. 3. Configuração inicial de parte do SDR com presença falta no Setor I

Observando os resultados dispostos na Tabela 1, fica clara a característica “mono-objetivo” de algumas tabelas internas do

AEMT-H. Nelas, os indivíduos presentes possuem os melhores desempenho para a respectiva função objetivo da seleção, no entanto, para os demais critérios eles possuem baixo desempenho ou mesmo que podem desrespeitar algumas restrições operacionais do SDR. Cabe destacar que estes indivíduos, no entanto, são fundamentais para o aumento do espaço de busca, elevando a probabilidade de localização de uma solução factível ótima e consequentemente contribuindo significativamente para convergência do algoritmo.

Tabela 1. Síntese das simulações para faltas simples (“mono-objetivo”)

Parâmetro	$\gamma(G)$ (kW)	$V(G)$ (%)	$X(G)$ (%)	$B(G)$ (%)	$\psi(G, G^0)$	
T_1	M	962.46	6.30	79.54	51.05	43.13
	D	7.53	0.09	0.00	0.65	10.70
T_2	M	1019.83	6.26	82.63	50.76	27.11
	D	34.32	0.00	8.93	1.18	6.44
T_3	M	1065.25	7.11	79.54	51.55	2.69
	D	20.26	0.45	0.00	0.80	1.89
T_4	M	1115.63	7.21	87.23	46.73	16.63
	D	112.51	0.94	11.93	2.55	11.11

M - Média D - Desvio Padrão

Já para o caso da Tabela 2, os resultados médios apresentam uma melhor distribuição entre as características de cada indivíduo para as diversas funções objetivos e restrições do problema. Isto tendo em vista que, além do objetivo principal da respectiva tabela, critérios de desempate são aplicados resultando em valores mais próximos dos encontrados nos indivíduos com melhores desempenhos para a respectiva característica. Como exemplo, a tabela T_6 possui um objetivo “principal” no qual seus indivíduos devem possuir “01 par de manobras”, ou seja, 07 manobras (sendo 03 manobras de abertura de chaves “NF” para isolamento do setor em falta, 02 de fechamento de chaves “NA” para restabelecimento inicial e mais 02, uma de abertura e outra de fechamento, para o “par de manobras” estabelecido na tabela). Em complemento, tendo em vista a atribuição do critério de desempate como sendo o do indivíduo que possui o menor resultado na soma do percentual de carregamento da rede com o percentual da queda de tensão, os valores médios de $V(G)$ e $X(G)$ são bem próximos dos melhores indivíduos para estes objetivos que estão armazenados nas tabelas T_2 e T_3 .

A Tabela 3 sintetiza os tempos de processamento em cada uma das 50 simulações do AEMT-H quando da presença de uma falta simples no Setor I do SDR de Londrina. De maneira empírica, podemos afirmar que o tempo médio em torno de 13 segundos indica que a solução é viável para aplicações de tempo real. Baseamos esta afirmação na comparação deste valor com o limite considerado pela ANEEL para caracterizar interrupções de energia como sendo “Falhas Momentâneas” (que atualmente é de até 180 segundos).

5.2. Simulações para Faltas Múltiplas

Para verificar o caso de múltiplas faltas permanentes no SDR de Londrina, o sistema em questão foi simulado considerando

a ocorrência de falta em 5 setores, pertencentes à diferentes alimentadores, sendo todos da mesma barra de uma determinada SE. Com isso o impacto simulado foi o da perda total de uma das barras da SE com necessidade de transferência da carga utilizando somente equipamentos da rede.

Tabela 2. Síntese das simulações para faltas simples

Parâmetro	$\gamma(G)$ (kW)	$V(G)$ (%)	$X(G)$ (%)	$B(G)$ (%)	$\psi(G, G^0)$	
T_6	M	1038.70	6.69	79.54	51.41	2.01
	D	13.24	0.08	0.00	0.04	0.13
T_7	M	1017.16	6.57	79.54	51.41	4.00
	D	15.14	0.07	0.00	0.01	0.00
T_8	M	1008.13	6.45	79.54	51.41	6.00
	D	14.62	0.12	0.00	0.04	0.00
T_9	M	997.43	6.35	79.54	51.43	8.00
	D	12.80	0.08	0.00	0.20	0.00
T_{10}	M	993.47	6.31	79.54	51.40	10.00
	D	10.69	0.03	0.00	0.17	0.00
T_{11}	M	989.26	6.30	79.54	51.37	12.00
	D	13.83	0.02	0.00	0.27	0.00
T_{12}	M	992.69	6.65	79.54	51.39	5.13
	D	20.98	0.09	0.00	0.16	2.12

M - Média D - Desvio Padrão

Tabela 3. Tempo de processamento das simulações para faltas simples

	Médio	Menor	Maior
Tempo de Processamento (s)	13.01	9.95	18.66

As Tabelas 4 e 5 apresentam os resultados avaliando as 50 simulações realizadas no SDR. A Tabela 4 sintetiza os resultados considerando os indivíduos com melhores desempenhos presentes nas tabelas relacionadas aos objetivos e restrições do problema. Já a tabela 5 apresenta os resultados considerando as tabelas internas do AEMT-H associadas à quantidade de manobras e dominância de Pareto. Por fim, a Tabela 6 sintetiza os tempos de processamento em cada uma das 50 simulações do AEMT-H quando da presença de múltiplas faltas no SDR de Londrina.

Tabela 4. Síntese das simulações para faltas múltiplas – tabelas “mono-objetivos”

Parâmetro	$\gamma(G)$ (kW)	$V(G)$ (%)	$X(G)$ (%)	$B(G)$ (%)	$\psi(G, G^0)$	
T_1	M	1076.41	6.88	83.55	55.26	55.44
	D	19.37	0.27	4.51	1.82	8.34
T_2	M	1165.62	6.77	88.49	54.79	33.21
	D	53.35	0.07	8.90	3.04	15.33
T_3	M	1227.39	8.49	82.34	52.64	15.35
	D	77.85	3.20	4.25	2.25	12.48
T_4	M	1468.85	9.99	115.92	47.37	27.04
	D	262.51	3.71	30.88	2.63	16.06

M - Média D - Desvio Padrão

A análise dos resultados da Tabela 4 reforça as considerações apresentadas quando da análise da Tabela 1. Nota-se que as tabelas internas do AEMT-H apresentadas nesta síntese (T_1 a

T_4) armazenam indivíduos com melhores desempenhos para a função objetivo da tabela (perdas, queda de tensão, carregamento da rede e SE), no entanto a avaliação das demais características fica distante dos respectivos pontos ótimos encontrados nas simulações, sendo que em alguns casos estes valores desrespeitam as restrições do problema.

Tabela 5. Síntese das simulações para faltas múltiplas – demais tabelas

Parâmetro	$\gamma(G)$ (kW)	$V(G)$ (%)	$X(G)$ (%)	$B(G)$ (%)	$\psi(G, G^0)$	
T_6	M	1247.74	8.65	92.33	53.15	2.18
	D	96.62	3.31	11.84	2.23	0.68
T_7	M	1200.95	7.55	86.20	52.78	4.00
	D	64.95	1.92	6.34	1.83	0.11
T_8	M	1175.72	7.20	84.19	52.78	6.00
	D	47.26	1.19	4.68	1.90	0.00
T_9	M	1160.14	7.00	83.46	52.77	8.00
	D	39.96	0.83	4.26	1.88	0.00
T_{10}	M	1150.99	6.90	83.22	52.94	10.00
	D	34.35	0.21	4.34	1.86	0.00
T_{11}	M	1145.63	6.89	83.16	53.04	12.00
	D	34.09	0.21	4.33	1.97	0.00
T_{12}	M	1133.88	7.22	85.22	53.16	6.29
	D	60.93	1.39	6.57	1.67	2.72

M - Média D - Desvio Padrão

Da mesma forma, análise dos resultados da Tabela 5 reforça as considerações apresentadas na análise da Tabela 2. Considerando ainda os objetivos do problema de restabelecimento apresentados na seção 3, observa-se que os indivíduos sintetizados na Tabelas 2 e 5 apresentam uma menor quantidade de manobras e atendem às restrições apresentadas na mesma seção.

Tabela 6. Tempo de processamento das simulações para faltas múltiplas

	Médio	Menor	Maior
Tempo de Processamento (s)	14.92	10.33	24.97

Por fim, os valores de tempo de processamento para faltas múltiplas sintetizados na Tabela 6 mantém a aplicabilidade do AEMT-H para ações de tempo real.

6. CONCLUSÕES

Este artigo avaliou a metodologia para restabelecimento de energia denominada AEMT-H, que se baseia em algoritmos evolutivos multi-objetivos e na estrutura de dados RNP. Esta avaliação ocorreu através da aplicação do AEMT-H para obtenção de PREs após a ocorrência de faltas permanentes, simples e múltiplas, no sistema da COPEL da cidade de Londrina, Paraná.

De uma forma geral o AEMT-H apresentou resultados bastante satisfatórios e coerentes com os presentes em (Santos et. al., 2010) e (Sanches et. al., 2014). Através da discriminação dos resultados encontrados em cada uma das tabelas internas do AEMT-H foi possível observar o comportamento da metodologia e compreender melhor a forma com que o algoritmo converge. Pela aplicação em um sistema real e com a análise de profissionais da área, foi

possível ainda validar a consistência dos resultados obtidos pelo AEMT-H, cujas configurações finais apresentaram soluções factíveis e próximas ao esperado pela área.

Por fim, os tempos de processamento computacional para obtenção dos resultados foram coerentes com os necessários para aplicação da ferramenta em atividades de tempo real.

AGRADECIMENTOS

O presente artigo é parte de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica (PD 2866-0272/2012). O projeto está em andamento e conta com a participação de membros da USP, UFG e COPEL. Neste projeto as melhorias apresentadas neste artigo serão estudadas e, conforme entendimento, aplicadas na metodologia a ser desenvolvida.

REFERÊNCIAS

- Camillo, M. H. M. (2013). Avaliação de uma metodologia para restabelecimento de energia baseada em algoritmos evolutivos multi-objetivos no sistema de distribuição da COPEL na cidade de Londrina. São Carlos: USP, 2013. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Escola da USP – São Carlos, São Carlos.
- Delbem, A. C. B., de Carvalho, A. C. P. L. F., Policastro, C. A., Pinto, A. K. O., Honda, K. e Garcia, A. C. (2004). Node-depth encoding for evolutionary algorithms applied to network design, GECCO, pp. 678–687.
- Kagan, N., de Oliveira, C. C. B. e Robba, E. J. (2005). Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica, Edgard Blucher, São Paulo.
- Mansour, M., Santos, A., London, J., Delbem, A. e Bretas, N. (2010). Representação nó profundidade e algoritmos evolutivos aplica aplicados ao problema de restabelecimento de energia em sistemas de distribuição de energia elétrica, Congresso Brasileiro de Automática, 2010 pp. 1-7.
- Sanches, D. S., Junior, J. B. A. L. e Delbem, A. C. B. (2014). Multi-objective evolutionary algorithm for single and multiple fault service restoration in large-scale distribution systems, Electric Power Systems Research 110(0): 144-153.
- Sanches, D. S. (2013). Algoritmos evolutivos multiobjetivo para reconfiguração de redes em sistemas de distribuição de energia elétrica, . São Carlos: USP, 2013. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Escola da USP – São Carlos, São Carlos, 2013.
- Santos, A. C., Delbem, A. C. B., London Jr., J. B. A. e Bretas, N. G. (2010). Node depth encoding and multiobjective evolutionary algorithm applied to large-scale distribution system reconfiguration, Power Systems, IEEE Transactions on 25(3): 1254-1265.
- Santos, A.; Delbem, A. e Bretas, N. (2008). Energy restoration for largescale distribution system using ea and a new data structure, Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century: pp. 1–8.