

Alocação Ótima de Bancos de Capacitores em Redes de Distribuição Baseada no Algoritmo SPEA2 Considerando Cargas Não Lineares

V. S. Kataoka, UFRA; A. S. Lima, UFRA; J. H. D. de Souza, UNIFAP; D. C. Mendes, CEA
J. P. A. Vieira, UFPA; U. H. Bezerra, UFPA; M. E. L. Tostes, UFPA

Resumo—Este trabalho é uma contribuição ao problema de alocação e dimensionamento ótimo de bancos de capacitores (BC's) em redes de distribuição radiais considerando a presença de cargas não lineares bem como seus efeitos e limitações impostas ao próprio problema. Para isso, formulou-se o problema sob a concepção multiobjetivo, propondo-se o SPEA2 (*Strength Pareto Evolutionary Algorithm*) como algoritmo de otimização. Sabendo da importância que a alocação de bancos de capacitores tem para o planejamento e manutenção dos níveis das variáveis elétricas em sistemas de potência, torna-se relevante, do ponto de vista pragmático, a consideração de cenários de ressonância harmônica e de que forma ela influencia a alocação ótima de BC's.

Palavras Chave— redes de distribuição, SPEA2, cargas não lineares, otimização multiobjetivo, bancos de capacitores, ressonância harmônica.

I. INTRODUÇÃO

A instalação de bancos de capacitores sempre se mostrou uma alternativa eficaz àqueles que trabalham nas áreas de planejamento e melhorias dos sistemas de potência, quer seja na transmissão quer seja na distribuição de energia elétrica. Sobretudo nesta última, a diminuição do valor empregado por kvar instalado ao longo dos últimos anos tem propiciado a maior abrangência do emprego de bancos de capacitores tanto em redes primárias de distribuição como também em redes secundárias.

Ao longo das últimas décadas, os métodos de otimização passaram a ser amplamente utilizados para alocação dos bancos de capacitores, explorando o menor custo possível e mantendo os níveis desejados para todas as variáveis elétricas do sistema. Neagle e Samson [14] são os pioneiros nas pesqui-

sas envolvendo a alocação ótima de Bancos de Capacitores. No entanto, seus trabalhos eram muito incipientes, pois assumiam muitas condições ideais (como é o caso da carga uniformemente distribuída). A partir daí, desenvolveram-se muitos trabalhos, os quais retratam o uso de Inteligência Artificial, Algoritmos Genéticos, Sistemas Especialistas, entre outros [1] [15].

Os desafios impostos às concessionárias de distribuição de energia elétrica crescem na medida em que aumenta o número de consumidores, os quais são amparados por um arcabouço normativo cada vez mais exigente. Nesse cenário, problemas que no passado recebiam pouca ênfase, agora passam a figurar como antagonistas principais. Esse é o caso da presença cada vez maior de cargas não lineares atreladas à rede, o que implica na distorção da forma de onda de tensão caso nenhuma medida mitigadora venha a ser implementada.

Os harmônicos, como são conhecidos, levam as concessionárias a repensar as estratégias tomadas no planejamento e na manutenção das grandezas elétricas a que se propõem manter sob controle. Observando esse fato, a alocação ótima de bancos de capacitores em redes de distribuição precisa ser feita agora de modo a observar a presença desse conteúdo harmônico e a prever o quão nocivos serão seus efeitos na rede de distribuição. O fenômeno da ressonância harmônica ocorre justamente quando um banco de capacitores é alocado em um ponto da rede em que a impedância resultante do sistema, vista a partir desse ponto, ressoa com a impedância do banco, provocando a amplificação de uma ou mais componentes harmônicas presentes na rede.

Trabalhos relativamente recentes, como [2] [4] [7] [9] [10] [11], passam a tratar o problema da alocação ótima de bancos sob essa nova perspectiva, em que a presença de harmônicos é modelada segundo uma restrição da função objetivo a ser minimizada pela metaheurística.

Sob todos os argumentos até aqui apresentados, este trabalho torna-se relevante na medida em que o problema de alocação ótima de bancos de capacitores com a consideração dos harmônicos e de seus efeitos pode ser visualizado pelo prisma multiobjetivo. Dessa forma, o uso do SPEA2 para o referido problema será mais um avanço nesse recente nicho da pesquisa.

A. S. Lima, Engenheiro Eletricista da Universidade Federal Rural da Amazônia (email: athila.ufra@gmail.com)
J. H. D. de Souza, Professor da Universidade Federal do Amapá (email: henrique.ufpa@gmail.com)
V. S. Kataoka, Engenheiro Eletricista da Universidade Federal Rural da Amazônia (email: vitor.kataoka@ufra.edu.br)
D. C. Mendes, Engenheiro da Companhia de Eletricidade do Amapá (email: dennys.mendes@cea.ap.gov.br)
J. P. A. Vieira, Professor da Universidade Federal do Pará (email: jpavieira@ufpa.br)
U. H. Bezerra, Professor da Universidade Federal do Pará (email: bira@ufpa.br)
M. E. L. Tostes, Professora da Universidade Federal do Pará (email: tostes@ufpa.br)

II. FUNDAMENTAÇÃO

A. Descrição do Problema

As concessionárias de distribuição de energia buscam, através da alocação de bancos de capacitores em pontos estratégicos, principalmente a manutenção das grandezas elétricas de sua competência como, por exemplo, a tensão nas barras, cuja diferença com o valor nominal não deve exceder 5% deste. Além disso, bancos de capacitores são capazes de suprir a demanda local de reativos, o que, consequentemente, desonera os alimentadores principais.

Para alocar bancos de capacitores em uma determinada rede, é necessário primeiramente determinar a quantidade, a localização, o valor nominal e se o banco será fixo, caso em que o banco atua em todos os níveis de carga, ou se o banco será chaveado, atuando nos períodos de carga média e pesada. Evidentemente, existem pontos do sistema em que a alocação de um banco de capacitores apresentará melhorias mais significativas se comparadas a outros pontos da rede para o mesmo banco. Apoiada a esse fato, a utilização de estratégias de otimização para alocação de bancos de capacitores em redes de distribuição perpassa desde métodos matemáticos até o uso de metaheurísticas e inteligência artificial.

Por outro lado, a negligência de fenômenos decorrentes do aumento da demanda, sobretudo de cargas não lineares atreladas à rede, pode trazer sérios problemas ao sistema e aos seus componentes. A inclusão dos efeitos causados pelos harmônicos, no entanto, torna o problema de alocação de bancos de capacitores, que já não era trivial, ainda mais complexo, haja vista a existência de pontos que poderiam ser indicados como mais adequados à recepção de um banco de capacitores virem a ser alvos de potenciais problemas.

Sabe-se que, de maneira geral, o objetivo da alocação ótima de bancos de capacitores em redes de distribuição é a obtenção de um bom desempenho do sistema com baixo custo de instalação e operação, sem, no entanto, infringir nenhum dos limites estabelecidos pelo arcabouço legal. Nesse sentido, a implementação computacional de um algoritmo de otimização para o referido problema enfrenta uma complexidade que aumenta exponencialmente conforme aumentam o número de barras do sistema.

B. Fluxo de Carga

Muitos trabalhos na literatura, tais como [15], relatam o fato de que métodos tradicionais, usados para resolução de fluxo de carga em sistemas de transmissão, não apresentam o mesmo desempenho em redes de distribuição devido às suas peculiaridades, como a relação entre resistência e reatância (R/X) do modelo de linha muito maior se comparada àquela obtida dos modelos adotados na transmissão; os efeitos capacitivos dos modelos π das linhas são, em geral, desprezados haja vista os níveis de tensões serem relativamente baixos; e, em se tratando de sistemas de distribuição, as topologias são basicamente radiais. O método de Newton, quase unanimidade quando se trata de robustez e confiabilidade de seus resultados, tem como crítica o tempo

demandado de simulação, uma vez que para cada nova solução possível de bancos em suas respectivas barras, é necessário um novo cálculo de fluxo de carga.

Por esse motivo, são usados métodos específicos para o cálculo de fluxo de carga em redes de distribuição radiais ou fracamente malhadas, notadamente, os métodos do somatório de correntes e do somatório de potências, dentre outros. Para este trabalho, faz-se uso do método do somatório de correntes, o qual apresenta fácil implementação sem, contudo, perder a confiabilidade e robustez. As equações (1) e (2) determinam a soma das correntes nos ramos no sentido inverso, ou seja, das barras de maior para as de menor índice, enquanto a equação (3) realiza a estimativa das tensões no caminho direto (partindo da subestação para barras terminais) a cada iteração.

$$I_k = \frac{P_k - jQ_k}{V_k^*} \quad (1)$$

$$I_{km} = \sum_{j=1}^J I_{mj} + I_k \quad (2)$$

$$V_m = V_k - I_{km} Z_{km} \quad (3)$$

Sabendo que a cada iteração seria necessário apontar o estado do sistema nas frequências harmônicas e que isso demandaria um esforço computacional relativamente grande, optou-se pela utilização do método de injeção de correntes. Trata-se de um método direto em que é resolvida a equação (4) [8] [13] tantas vezes quanto forem o número de harmônicos presentes no sistema, isto é, para cada frequência harmônica, modela-se o sistema e efetua-se o cálculo referido por (4).

$$\begin{aligned} [I_h] &= [Y_h][V_h] \\ &\vdots \quad \vdots \quad \vdots \\ [I_3] &= [Y_3][V_3] \\ [I_2] &= [Y_2][V_2] \end{aligned} \quad (4)$$

$[Y_h]$ é a matriz admitância obtida para a frequência 'h'. O vetor de correntes $[I_h]$ é composto pelas correntes harmônicas advindas dos modelos dos elementos não-lineares que compõem o sistema de distribuição.

As cargas não lineares usadas neste trabalho são representadas através do modelo de correntes, sendo descritas em [6]. Os modelos representam um retificador de 6 pulsos (circuito clássico em eletrônica de potência, presente em aplicações diversas), um reator controlado a tiristor (do inglês *thyristor controlled reactor* – TCR) e de outras cargas não lineares genéricas.

C. Otimização Multi-Objetivo

Um Problema de Otimização Multi-Objetivo (MOOP, do inglês *Multi-Objective Optimization Problem*), é composto por

um conjunto de funções objetivo a serem otimizadas e por um conjunto de restrições a serem satisfeitas [2] [17].

As funções objetivo que compõe um MOOP podem ser conflitantes, de maneira que não é possível melhorar a performance de uma sem afetar negativamente o desempenho da outra.

Nos MOOP, é utilizado o conceito de dominância de Pareto para a comparação das soluções do problema. Ocorre a dominância de um indivíduo 'p' sobre um indivíduo 'q' quando:

1. 'p' é melhor que 'q' em pelo menos um dos objetivos;
2. Em todos os outros objetivos, 'p' não é pior que 'q'.

Dessa forma, uma solução dominada por outra não pode fazer parte do conjunto de melhores soluções, pois a solução que a dominou é melhor em pelo menos um dos objetivos e é melhor ou igual nos demais. Com isso, conclui-se então que o conjunto de soluções ótimas, denominado Pareto-Ótimo, é formado pelo conjunto das soluções não dominadas do problema.

Ao fim da análise de dominância, é formado um grupo de indivíduos não dominados, o qual se denomina fronteira ou *front*. Um conjunto que contenha apenas elementos do Pareto-Ótimo dificilmente surgirá desde a primeira iteração, ocorrendo na realidade uma formação gradativa das fronteiras. Nessa situação, as soluções encontradas ainda não são as da Fronteira de Pareto. Entretanto, dentre as soluções encontradas, há as que mais se aproximem do Pareto-Ótimo, que são as soluções não dominadas, formadoras de F1. A Fronteira seguinte, F2, é formada pelas soluções dominadas apenas por indivíduos de F1, enquanto as soluções das demais fronteiras são dominadas por múltiplas soluções.

D. SPEA2 (Strength Pareto Evolutionary Algorithm – II)

Assim como os demais algoritmos multiobjetivos que o antecederam, o SPEA2 [1] [5] busca no espaço dos objetivos as soluções dominantes, constituintes do front de Pareto.

O algoritmo se baseia em duas populações: a população P normal e a população P', chamada de *archive*, em que as soluções não-dominadas são armazenadas. A aptidão é realizada sobre o conjunto resultante $Q = P + P'$. O cálculo da aptidão de uma dada solução i no SPEA2 depende do número de soluções que a solução i domina (*strength fitness* - $s_f(i)$) e do parâmetro *raw fitness* ($r_f(i)$), que corresponde à soma dos $s_f(i)$ de todas as soluções que dominam i , conforme expressam as equações (5) e (6) respectivamente.

$$s_f(i) = \left| \{ j, j \in Q, \text{tal que } i \prec j \} \right| \quad (5)$$

$$r_f(i) = \sum_{j \prec i} s_f(j) \quad (6)$$

A diversidade de soluções do algoritmo é garantida através de um parâmetro denominado densidade, $d(i)$, o qual é inversamente proporcional à distância do k -ésimo vizinho mais próximo de i (7).

$$d(i) = \frac{1}{\sigma_{i,k} + 2} \quad (7)$$

Finalmente, a aptidão da solução i é calculada através de (8).

$$A(i) = r_f(i) + d(i) \quad (8)$$

Durante a execução do SPEA2 haverá ocasiões em que a população P' excede o tamanho do *archive*, necessitando de uma estratégia extra para a adequação de P'. Esse problema é resolvido com o algoritmo de corte, em que as soluções do *archive* são ranqueadas através da distância entre os indivíduos, sendo eliminados aqueles que tiverem a menor distância ao k -ésimo indivíduo mais próximo.

III. IMPLEMENTAÇÃO

O sistema de testes escolhido foi a rede radial de 34 barras mostrada na Fig. 1, cujas características podem ser encontradas em [15], no qual posteriormente foram inseridas as cargas não-lineares.

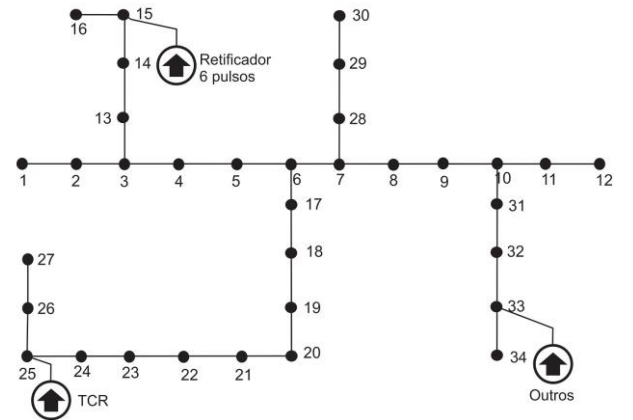


Fig. 1. Representação do sistema utilizado nas simulações
FONTE: LIMA *et al*, 2015.

A Fig. 2 apresenta o fluxograma utilizado na implementação da metodologia proposta neste trabalho. Nota-se que o fluxo de carga, tanto na frequência fundamental quanto nas frequências harmônicas, é executado para cada nova configuração do sistema, ou seja, para cada indivíduo do algoritmo, o qual representa uma solução para o problema. Isso, de certa forma, onera o processamento computacional e motiva a busca por rotinas de fluxo de carga mais eficientes. Outro ponto que merece destaque no algoritmo implementado diz respeito às restrições de desigualdade. Buscou-se atentar para aspectos normativos baseados em [3] e [12] para estipular os limites estabelecidos, a partir dos quais uma solução poderia ser considerada factível ou não factível. Para cada solução não factível, foi necessário seu reprocessamento, isto é, um novo indivíduo foi gerado e testado novamente segundo as restrições citadas.

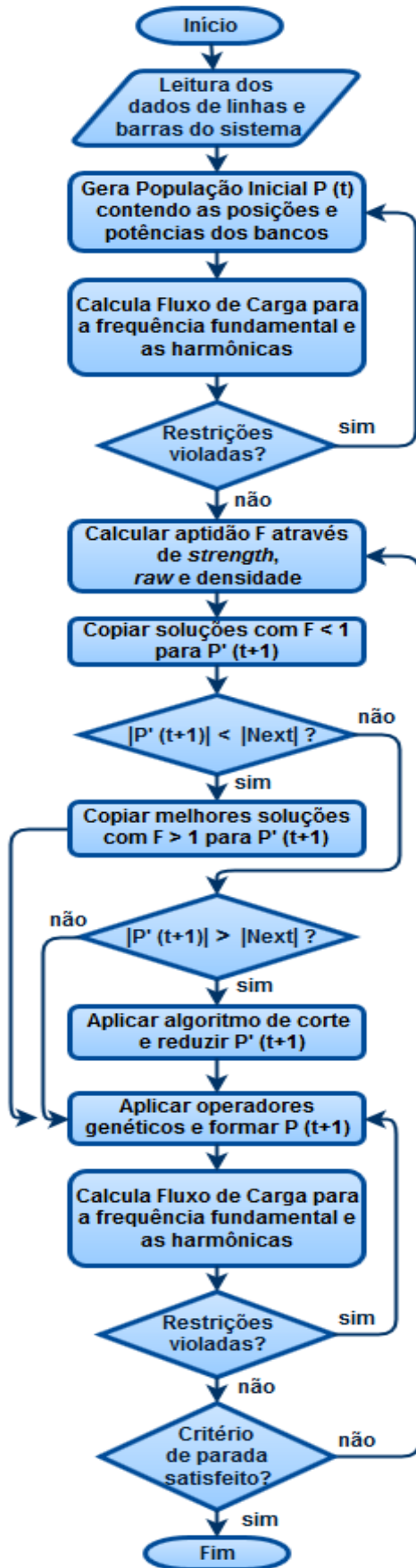


Fig. 2. Fluxograma da implementação computacional do problema
 FONTE: Autoria própria.

IV. TESTES E RESULTADOS

Conforme mencionado nos tópicos anteriores, os problemas multiobjetivos são compostos por mais de um objetivo, geralmente conflitantes, em que se buscam as situações em que a melhora em um dos objetivos não venha a piorar nenhum dos demais. Sob esse prisma, o problema de alocação de bancos de capacitores pode ser modelado considerando dois objetivos: efetuar a manutenção dos níveis de tensão nas barras, conforme a equação (9), e; minimizar a função custo composta pelas perdas ativas nas linhas (tanto da frequência fundamental quanto das frequências harmônicas), bem como pelos custos de instalação dos BC's (composto pelos preços dos BC's e pelo custo de instalação propriamente dito), segundo a equação (10) [2] [4].

$$\min F_1 = k_a \sum_{m=1}^{N_b} (C_b) + k_b \sum_{n=1}^{N_b-1} (P_f + P_h) \quad (9)$$

$$\min F_2 = \max \|V_{REF} - \vec{V}_j\| \quad (10)$$

Onde,

$F_1, F_2 \rightarrow$ objetivos

$k_a, k_b \rightarrow$ constantes que indicam o custos unitários dos bancos e do kWh em um determinado tempo, respectivamente

$C_b \rightarrow$ valores dos bancos de capacitores individualmente

$P_f \rightarrow$ perdas ativas na frequência fundamental

$P_h \rightarrow$ perdas ativas nas frequências harmônicas

$N_b \rightarrow$ número máximo de barras

$V_{REF} \rightarrow$ tensão de referência

$V_j \rightarrow$ tensão em cada barra

Todos os testes foram realizados no *software* MATLAB 8.3.0. O custo adotado para os preços dos BC's, já inseridos os custos de instalação, foi de US\$4 por kvar. Foram considerados bancos de 300, 600 e 1200 kvar. Desta forma, para cada barra, supôs-se 4 possíveis configurações: com um banco de 300 kvar, ou com um banco de 600 kvar, com um banco de 1200 kvar ou sem a instalação de BC's. Assim sendo, cada indivíduo foi representado por um cromossomo composto por 34 genes (o mesmo número de barras) e 68 alelos, conforme [2], responsáveis por descrever as 4 situações supracitadas. (Tabela I). Observa-se que na metodologia proposta não há possibilidade de instalação de mais de um banco em uma mesma barra, ou seja, não é incluída a associação de BC's ao problema.

TABELA I
 CONFIGURAÇÕES E PREÇOS DOS BANCOS DE CAPACITORES CONSIDERADOS

Configuração	Tamanho (kvar)	Custo (US\$)
00	Sem banco	0
01	300	1200
10	600	2400
11	1200	4800

FONTE: LIMA *et al*, 2015.

Na implementação do algoritmo SPEA2, adotou-se 100 indivíduos e 300 gerações, totalizando 30 mil soluções factíveis em um total de $7,4 \times 10^{19}$ soluções possíveis para o espaço de busca. A taxa de mutação utilizada foi de 1,47% (proveniente da probabilidade de 1/Alelos) e a taxa de cruzamento foi de 90% com um ponto de corte. Todos os valores dos parâmetros citados até então são os mesmos utilizados em [2].

Os resultados da simulação do SPEA2 para 300 gerações podem ser visualizados na Fig. 3. A fim de melhorar a visualização dos resultados, optou-se pela supressão de todas as soluções factíveis que ficaram fora do *front* de Pareto, deixando, além dessas, apenas aquelas que apresentaram algum tipo de violação.

As soluções em preto representam os pontos em que houve violação de THD. Já as soluções em vermelho representam as violações de tensão nas barras. As soluções em azul, por sua vez, compõem o *front* de Pareto. Percebe-se que muitas das soluções em que houve a violação dos níveis de tensão, houve também a violação dos níveis de THD. Tal comportamento já era esperado, uma vez que a forma de onda resultante da tensão é composta pela fundamental associada aos harmônicos e, em ocasiões de fortes distorções, como é o caso de ressonância harmônica, a amplitude do harmônico ressonante é elevadíssima, o que acaba por comprometer também o nível de tensão na barra.

Comparando os resultados com os obtidos em [2], observa-se que, ao utilizar o SPEA2, formou-se um *front* diferente, cujas soluções dentro de uma determinada faixa, inclusive, são melhores que aquelas apresentadas na referida referência. Outra comparação que pode ser feita, refere-se ao fato de uma quantidade maior de violações de tensão, sobretudo na região de soluções com um menor número de BC's alocados. Certamente, tal comportamento representa uma busca incessante dentre as mais baratas possíveis que não violem os limites de tensão. De certo que quanto maior a exploração nessa área, mais sujeitas serão as soluções a possíveis violações de tensão.

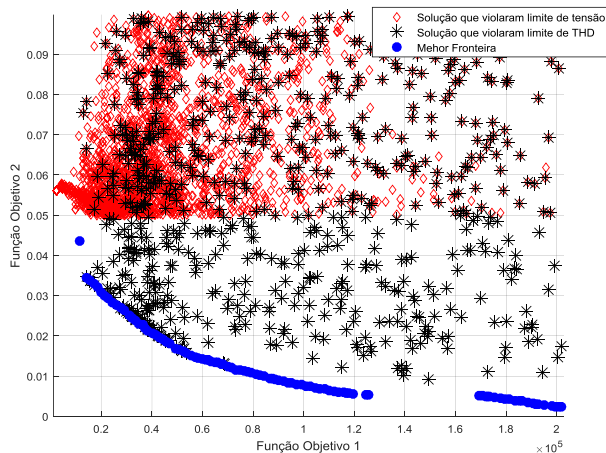


Fig. 3. Front de Pareto e soluções não factíveis para o problema proposto
FONTE: Autoria própria.

Outra análise da Fig. 3 revela que algumas soluções eliminadas por violarem o THD ficaram muito próximas àquelas que compõem o *front* de Pareto. Isso leva à conclusão que caso não tivessem sido excluídas forçadamente do algoritmo, tais soluções poderiam vir a compor o *archive* e consequentemente terem seu material genético replicado nas próximas gerações. Em termos práticos, se tal restrição não existisse, o algoritmo poderia retornar ao operador configurações de BC's que possivelmente iriam acarretar em ressonância harmônica.

A Fig. 4 mostra o *front* de Pareto isolado das demais soluções. Atenta-se para o ponto em destaque, cuja distância em relação à referência é a menor se comparada a de seus pares. A utilização da referência busca obter uma única solução que seja equilibrada com relação aos dois objetivos. Longe da análise prática, a referência seria o mínimo ideal para as duas funções, que dominaria todas as soluções no problema. Assim, o ponto do *front* que mais se aproxima da referência seria o representativo da interseção dos objetivos, ou seja, aquele que conseguiu extrair, em termos práticos, os resultados mínimos que satisfaçam os dois objetivos simultaneamente. Ressalta-se que, para um problema multiobjetivo, em nenhuma ocasião, pode-se alegar que esse ponto é melhor que os demais que, junto com ele, formam o *front* de Pareto.

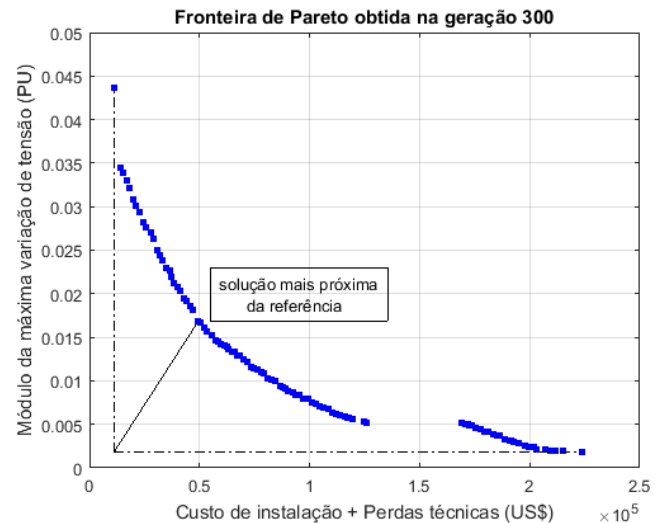


Fig. 4. Front de Pareto com o ponto mais próximo dos mínimos dos objetivos
FONTE: Autoria própria.

Para fins de comparação, a Tabela II mostra os resultados dos extremos do *front* de Pareto, em que se observa que a solução 2 apresenta uma quantidade moderada de BC's instalados comparativamente às soluções 1 e 3 que são os extremos do *front*. Conforme esperado, a solução mais barata (solução 1) é aquela com o menor número de BC's instalados, porém com os maiores desvios de tensão nas barras. Por outro lado, a solução 3 não apresenta desvios superiores a 0,18%, necessitando, para isso, de um maior número de BC's alocados. Tais constatações podem ser feitas analisando os objetivos de cada solução mostrados ao final da Tabela.

TABELA II
COMPARAÇÃO ENTRE A SOLUÇÃO MAIS PRÓXIMA DA ORIGEM COM OS
EXTREMOS DO FRONT.

Barras	Banco (kvar)		
	Solução 1	Solução 2	Solução 3
1	0	0	0
2	0	0	600
3	0	0	0
4	0	300	300
5	0	1200	1200
6	0	1200	1200
7	300	1200	1200
8	0	300	1200
9	0	0	300
10	0	300	600
11	0	1200	1200
12	0	1200	600
13	0	1200	0
14	0	300	0
15	0	0	300
16	0	0	300
17	0	0	1200
18	0	0	1200
19	0	0	1200
20	0	0	1200
21	0	0	1200
22	0	0	1200
23	0	0	1200
24	0	0	1200
25	0	0	1200
26	0	0	1200
27	0	0	1200
28	0	0	1200
29	300	300	1200
30	300	300	600
31	600	1200	1200
32	0	0	300
33	0	600	300
34	0	0	0
Objetivo 1	0,436829587	0,016806993	0,001864315
Objetivo 2	\$11.283,26	\$49.362,91	\$223.513,56

V. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma proposta de abordagem multiobjetivo para o problema de alocação e dimensionamento ótimo de BC's em redes de distribuição radiais. Nesse caso, o algoritmo de otimização usado, SPEA2, cuja característica é fortemente elitista, apresentou bons resultados na estimação da Fronteira Ótima de Pareto. Constatou-se a versatilidade que as estratégias multiobjetivo disponibilizam ao planejamento, permitindo aos operadores escolher dentre as soluções do *front* de Pareto a mais adequada às suas necessidades. Outra conclusão importante deste trabalho sedimentou-se sobre o fato de que algumas soluções poderiam ser consideradas factíveis caso a presença de cargas não lineares fosse negligenciada, o que poderia levar o sistema a problemas de

qualidade de energia, inclusive de ressonância harmônica que, como é sabido, tem consequências graves que vão desde sobrecarga, sobreaquecimento, perda de isolamento e diminuição da vida útil de elementos do sistema. Em se tratando dos próprios BC's, altos níveis de ressonância harmônica aumentam a tensão sobre eles o que pode acarretar em falhas ou perda precoce dos mesmos.

VI. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Companhia de Eletricidade do Amapá (CEA) que é a instituição fomentadora desta pesquisa.

VII. REFERÊNCIAS

- [1] A. M. F. de Almeida, "Otimização Multiobjetivo e Lógica Fuzzy aplicados ao Planejamento Integrado de Bancos de Capacitores e Reguladores de Tensão em Redes de Distribuição". Tese de Doutorado, UFCG. Campina Grande, 2009.
- [2] A. S. de Lima, J. H. D. de Souza, V. S. Kataoka, M. E. L. Tostes, U. H. Bezerra, J. P. A. Vieira. "Uso do NSGA II no Problema de Alocação e Dimensionamento Ótimo de Banco de Capacitores Considerando a Presença de Cargas Não Lineares". The XI Latin-American Congress Electricity Generation and Transmission - CLAGTEE 2015.
- [3] ANEEL. "Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, Módulo 7 – Cálculo de Perdas na Distribuição". 2010;
- [4] C. S. S. Salas. "Alocação de Capacitores em Redes de Distribuição Primárias e Secundárias Incluindo Restrições de Ressonância." Tese de Doutorado. Unicamp, 2010.
- [5] E. Zitzler e L. Thiele. "An Evolutionary Algorithm for Multiobjective optimization: The Strength Pareto Approach. TIK-Report, 1998.
- [6] E. H. Miller, "Test systems for harmonics modeling and simulation," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 14, No. 2. April 1999.
- [7] Eajal, A.A. and El-Hawary, M.E., "Optimal capacitor placement and sizing in distorted radial distribution systems part I: System modeling and harmonic power flow studies", presented at the Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2010 14th International Conference.
- [8] E. H. Miller, "Test systems for harmonics modeling and simulation," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 14, No. 2. April 1999.
- [9] R. J. Vidmar. (1992, Aug.). "Strategic capacitor placement in distribution systems by minimisation of harmonics amplification because of resonance". *IET Gener. Transm. Distrib.* 2012, Vol. 6, Iss. 7, pp. 646–656. February 2012.
- [10] H. R. Esmailian and R. Fadaeinedjad. "Optimal reconfiguration and capacitor allocation in unbalanced distribution network considering power quality issues". 22nd International Conference on Electricity Distribution. Stockholm, 2013.
- [11] H. Afaghzadeh, K. Valipour, M. Ebtehaj and H. Ghadimi. "Optimal Capacitor Placement with Consideration of Voltage Source Harmonic Distortion effect on Radial Distribution Networks Using Binary Particle Swarm Optimization (BPSO)".
- [12] IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems," IEEE Standard 519-1992, IEEE, New York, 1992.
- [13] J. Arrillaga and C. P. Arnold, Computer Analysis of Power Systems. New York: Wiley, 1990.
- [14] Neagle, N.M. e D.R. Samson (1956). Loss reduction from capacitors installed on primary feeders. Trans. of the American Inst. of Electrical Engineers, Vol. PAS-75, No. 3, pp. 950-959.
- [15] R. T. Beê. "Alocação de bancos de capacitores em sistema de distribuição de energia elétrica utilizando algoritmos genéticos". Dissertação de Mestrado. UFPR, Curitiba, 2007.
- [16] S.M. Hakimi, M. Zarringhalami, S. M. M. Tafreshi. "Optimal Capacitor Placement and Sizing in Non-Radial Distribution to Improve Power Quality", IEEE, 2010.
- [17] T. Weise, Global optimization Algorithm: theory and application. 2009.