

Alocação e configuração de bancos de capacitores utilizando um algoritmo Multiobjetivo NSGA-II

Allocation and configuration of capacitor banks using a Multi-Objective algorithm NSGA-II

DOI:10.34117/bjdv8n8-066

Recebimento dos originais: 21/06/2022

Aceitação para publicação: 29/07/2022

Felipe Santana Santos

Mestre

Instituição: Instituto Federal do Espírito Santo

Endereço: Rodovia BR Norte, Km 58, 101, São Mateus - ES

E-mail: felipe.santana@ifes.edu.br

Andréa Araújo Sousa

Doutora

Instituição: Universidade Federal de Sergipe

Endereço: Avenida Marechal Rondon Jardim, S/N, Rosa Elze, São Cristóvão - SE

E-mail: andreas@academico.ufs.br

Angelo Márcio Formiga de Almeida

Doutor

Instituição: Universidade Federal de Sergipe

Endereço: Avenida Marechal Rondon Jardim, S/N, Rosa Elze, São Cristóvão - SE

E-mail: angeloalmeida@academico.ufs.br

RESUMO

O objetivo deste trabalho é realizar a alocação e configuração ótima de bancos de capacitores (fixos ou chaveados) em um sistema de distribuição radial, considerando diferentes patamares de carga, de modo a minimizar as perdas ativas do sistema e o custo dos bancos de capacitores. Para isto, é utilizado o algoritmo multiobjetivo NSGA-II. Os resultados são apresentados através de um sistema radial de 34 barras do IEEE.

Palavras-chave: alocação ótima, bancos de capacitores, algoritmo Multiobjetivo.

ABSTRACT

The objective of this paper is to perform an optimal allocation and configuration of capacitor banks (fixed or switched) in a radial distribution system, considering different load levels, in order to minimize the losses of system assets and the cost of capacitor banks. For this, the NSGA-II multi-objective algorithm is used. Results are presented using an IEEE 34-bar radial system.

Keywords: optimal allocation, capacitor banks, Multi-Objective algorithm.

1 INTRODUÇÃO

O processo de distribuição e transmissão de energia elétrica envolve perdas que estão condicionadas à comercialização da energia e à operação do sistema elétrico. As perdas globais no sistema podem ser definidas como a diferença entre a energia que é gerada e transmitida no sistema e a energia que efetivamente é entregue aos consumidores finais e faturada (SOUSA; ALMEIDA; CARVALHO, 2015). Segundo dados da ANEEL as perdas em toda a rede elétrica chegam a cerca de 17,5%, sendo que desse total 4,2% se situam no setor de transmissão de energia e 13,3% na área de distribuição. De forma geral, as perdas no sistema elétrico são classificadas como:

- Perdas Técnicas: energia perdida no transporte e na transformação (inerente ao processo) e que ocorre antes do ponto de entrega;
- Perdas Comerciais: energia efetivamente entregue ao consumidor e que não foi faturada;
- Perdas na Transmissão: perdas de energia considerando o conjunto dos sistemas de Geração e Transmissão;
- Perdas na Distribuição: perdas de energia considerando apenas o sistema de Distribuição;
- Perdas Globais: perdas totais de energia considerando o conjunto dos sistemas de Geração, Transmissão e Distribuição.

O conhecimento das perdas técnicas no sistema de energia elétrica permite, por meio da comparação com as perdas totais, avaliar a presença e a importância das perdas comerciais, que são de grande relevância na queda da receita das empresas distribuidoras de energia, e a elaboração de planos de ação para diminuição dessas perdas. Além disso, a redução das perdas técnicas permite o atendimento de novos consumidores. Isso representa um aumento no faturamento por parte das concessionárias de distribuição, já que a parcela de energia que estava sendo perdida passa a ser efetivamente vendida (ALMEIDA, 2004).

Como forma de diminuir as perdas técnicas do sistema de distribuição de energia elétrica, os bancos de capacitores (BCs) são empregados para fornecer a compensação da potência reativa em sistemas de distribuição (DIREITO, 2010), consequentemente melhorando o fator de potência do sistema e mantendo a tensão dentro de limites aceitáveis. A resolução 1000/2021 da ANEEL estabelece o pagamento de acréscimo nas faturas dos consumidores que apresentem medição de fator de potência abaixo de 0,92,

assim, os consumidores são levados a corrigir o fator de potência, diminuindo a demanda por potência reativa da rede.

A compensação fornecida pela utilização dos BCs é totalmente dependente da forma como os bancos são inseridos no sistema, isto é, o tipo (fixo ou automático), a localização e a capacidade dos BCs adicionados. A alocação de BCs é um problema de difícil solução, pois o número de pontos mínimos locais e o número de opções a serem analisadas aumentam com o aumento do número de barras. Este trabalho tem como objetivo estudar a utilização do algoritmo multiobjetivo *Nondominated Sorting Genetic Algorithm-II* (NSGA-II) para determinação da melhor configuração de BCs para um determinado sistema de distribuição de energia elétrica, levando em conta o custo de instalação de tais bancos.

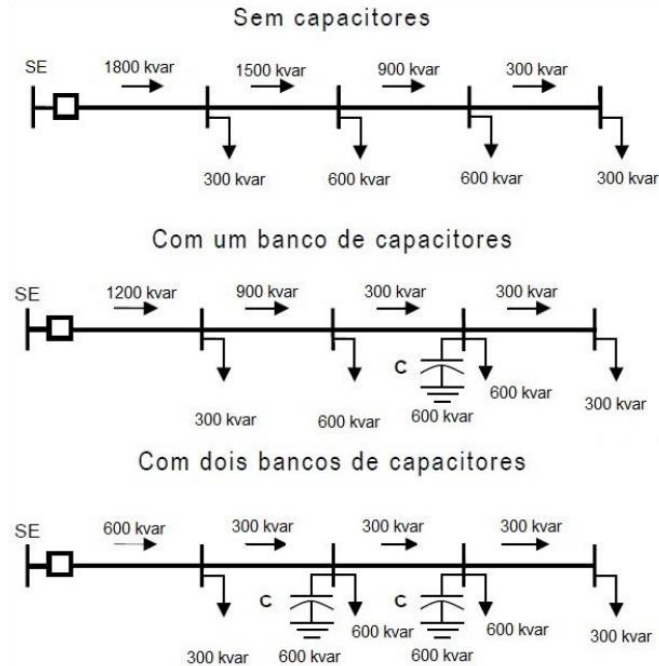
O sistema avaliado foi o sistema clássico do IEEE de 34 barras (IEEE, 1991). A alocação e configuração de forma otimizada foi feita por um algoritmo evolucionário multiobjetivo, o NSGA-II devido à sua robustez e eficácia em problemas de otimização em sistemas elétricos.

2 BANCOS DE CAPACITORES

Os bancos de capacitores (BCs) são utilizados em sistemas de distribuição de energia para compensação de reativos, contribuindo para a minimização das perdas técnicas e para a melhoria do perfil de tensão. Os BCs podem ser fixos ou automáticos. A quantidade de compensação fornecida está relacionada à localização dos capacitores no sistema de distribuição, tamanho, quantidade e tipo de capacitores a serem instalados no sistema (SUNDHARARAJAN; PAHWA, 1994).

Os BCs devem localizar-se de forma estratégica ao longo do alimentador (GODOI, 2009). Uma vez conhecido o perfil de fluxo de reativos do alimentador e a potência dos bancos a serem utilizados, a sua localização é feita do fim para o início do alimentador, levando-se em conta a compensação dos BCs já instalados, a Figura 7 ilustra esse processo.

Figura 1: Fluxo de potência reativa com e sem capacitores



Fonte: Bordim (2011).

Os BCs disponíveis no mercado podem ser do tipo fixo ou automático. Os bancos fixos possuem um valor fixo de potência e estão permanentemente em operação. Já para os bancos automáticos é possível ligar e desligar o BC dependendo da condição de carga para a qual está operando (SZUVOVIVSKI, 2008). Os bancos automáticos possibilitam uma maior flexibilidade, pois a potência reativa fornecida pode variar de acordo com a necessidade do sistema.

3 ALGORITMO MULTI OBJETIVO NSGA-II

Comparando os algoritmos evolucionários, principalmente os algoritmos genéticos (AGs), com os métodos clássicos de otimização multiobjetivo é possível notar a vantagem de utilizar algoritmos genéticos (ARROYO, 2002). A otimização multiobjetivo possui dois objetivos principais: definir um conjunto solução que esteja o mais próximo possível da fronteira de Pareto e tais soluções devem ser bem distribuídas, ou seja, devem estar bem espaçadas ao longo da fronteira (DEB *et al.*, 2002).

O NSGA-II é um algoritmo baseado em ordenamento elitista por não-dominância. Inicialmente é gerada uma população P_0 de tamanho N , os indivíduos são ordenados pelo critério de não-dominância. Assim cada uma das soluções recebe um rótulo que traduz a sua aptidão, soluções classificadas no nível 1 são as melhores.

Os indivíduos da população P_o são classificados em grupos, denominados frentes de Pareto F_k . As soluções pertencentes a cada conjunto possuem o mesmo nível de dominância. Um valor r , denominado grau de dominância, é atribuído a cada solução dos conjuntos F_k , de modo que as soluções com maior aptidão possuam maiores valores *fitness*, soluções que compõem uma frente F_k possuem o mesmo valor de r . A diversidade da população é preservada na atribuição do valor *fitness*. A aptidão de cada solução depende também do número de soluções localizadas ao redor da solução sob avaliação, essa medida é denominada de distância de *crowding*, também chamado na literatura de distância de aglomeração (DEB *et al.*, 2002).

A aptidão das soluções pode ser descrita de modo genérico pela seguinte equação:

$$AP_i = \frac{1}{r_i} + d_i \quad (1)$$

em que r_i é o índice k da frente da Pareto a qual a solução pertence e d_i é a distância de aglomeração da solução sob avaliação.

A partir da população P_o uma nova população Q_o é formada utilizando os operadores *seleção* e *cruzamento*, segundo os critérios citados no parágrafo anterior, Q_o também é de tamanho N . A união das populações P_o e Q_o formam a população $R_o = P_o \cup Q_o$, de tamanho $2N$. Os critérios de classificação de soluções em frentes F_k e distância de *crowding* são aplicados na população R_o , desta forma as soluções estarão classificadas segundo a sua aptidão. A população de descendentes é formada pelas N melhores soluções de R_o . As N soluções menos aptas são descartadas e o processo é repetido até que o critério de parada seja atingido.

4 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

O problema da alocação de BCs comumente consiste na busca do ponto ótimo de instalação e do tamanho dos BCs a serem instalados na rede, visando a redução das perdas e do custo de instalação de tais bancos. A função objetivo que contempla esses critérios é a seguinte:

$$FO = \min[f_1, f_2] \quad (2)$$

sendo:

$f_1 \rightarrow$ perdas técnicas;

f_2 → custo de instalação dos capacitores fixos e automáticos.

A seguir será feita uma breve descrição de cada uma das partes que compõe a função objetivo.

4.1 REDUÇÃO DAS PERDAS

A potência reativa que flui pelas linhas dos sistemas de transmissão e distribuição causa efeitos indesejáveis como o aumento das perdas de potência ativa, sendo que a redução desse fluxo de reativo pode ser conseguida pela instalação estratégica de banco de capacitores (BEÊ, 2007).

As perdas para os momentos de pico e fora de pico são calculadas utilizando um fluxo de carga, neste trabalho o método escolhido foi o método da soma de potências, por seu ótimo desempenho em sistemas de distribuição radiais.

$$\text{Perdas}_{\text{totais}} = \sum_{i=1}^2 \text{Perdas}_i \quad (3)$$

em que:

i → corresponde a condição de carga leve ou pesada.

4.2 CUSTO DOS CAPACITORES

A escolha do tamanho e do tipo de BC a ser instalado em um ponto da rede é um fator preponderante para o desempenho do algoritmo. Este trabalho contempla a opção de se utilizar BCs fixos ou automáticos com valores de 150, 300 e 600 kvar, mais a opção de não ser instalado nenhum capacitor na rede.

A Tabela 1 mostra o custo em reais dos BCs utilizados neste trabalho. Os custos dos bancos foram escolhidos com base em alguns trabalhos apresentados na literatura, em especial o trabalho (MICHEL, 2015).

Tabela 2: Custo dos Capacitores

Tipo de Banco	Valor [kvar]	Custo [R\$]
Fixo	150	8000,00
Fixo	300	10000,00
Fixo	600	12000,00
Automático	150	14000,00
Automático	300	17000,00
Automático	600	20000,00

Fonte: Michel (2015).

O custo devido a instalação dos BCs fixos e chaveados é dado pela seguinte equação:

$$f_2 = Cust_{BCs} = \sum_{bbc \in \Omega} (Fix_{bbc} \cdot C_{fix}) + (Auto_{bbc} \cdot C_{auto}) \quad (4)$$

em que:

bbc → barra com BC instalado;

Ω → conjunto de barras com BC instalado;

Fix_{bbc} → indica a instalação de BC fixo na barra bbc ;

C_{fix} → custo do BC fixo instalado;

$Auto_{bbc}$ → indica a instalação de BC automático na barra bbc ;

C_{auto} → custo do BC automático instalado.

As variáveis que indicam a instalação de BCs fixos e automáticos, respectivamente Fix_{bbc} e $Auto_{bbc}$, podem assumir o valor 1, caso o respectivo BC seja instalado na barra bbc ou 0, caso contrário.

4.3 CODIFICAÇÃO DO INDIVÍDUO

Neste trabalho a codificação foi feita no sistema binário e adotou-se um cromossomo contendo três partes principais. Apresenta-se na Figura 2, o cromossomo já decodificado para decimal. Essa forma de codificação foi baseada no trabalho de De Souza (2010).

Como citado o cromossomo foi dividido em três partes: a primeira informa as barras onde serão instalados os capacitores. A segunda informa o tamanho (em kvar) dos bancos chaveados para as condições de carga de pico. A terceira parte informa o tamanho do banco fixo. Sobre o tamanho dos bancos, os *bits* 00 representam 0kvar instalados, 01 representa um banco de 150 kvar instalado, 10 representa um banco de 300 kvar e 11 representa um banco de 600kvar.

Figura 2: Estrutura do cromossomo decodificado

Barra	Tamanho dos bancos instalados (em kvar)											
	bancos chaveados						bancos fixos					
31	12	8	24	150	300	0	150	600	150	300	0	

Fonte: Autoria própria

No caso da figura 2, temos que na barra 31 um banco fixo de 600 kvar foi alocado, tal banco está presente no sistema em todo tempo, isto é, no momento de pico e no momento fora de pico. Ainda nesta barra, um banco chaveado de 150 kvar também foi alocado, este fica presente no sistema durante o momento de pico, já no momento fora de pico ele não fornece potência reativa ao sistema. Já na barra 8, observa-se que um banco fixo de 300 kvar foi instalado, porém nenhum banco chaveado foi instalado nesta barra.

5 RESULTADOS

Foram considerados dois patamares de carga. Para o momento de carga leve, o sistema foi modificado aumentando-se o seu carregamento em 20% a fim de torná-lo mais crítico em termos de perfil de tensão e perdas. Já para o momento de carga pesada o sistema foi modificado aumentando-se o seu carregamento em 80%. Nas simulações foi considerado que o tempo de carga leve é igual a 16 horas diárias, enquanto que o tempo de carga pesada é igual a 8 horas. Para tais condições, o valor das perdas é de 0,5007MW.

A codificação do cromossomo foi feita de forma que o número máximo de barras com instalação de BCs foi igual a quatro, tal valor foi escolhido de acordo com o tamanho do sistema. O sistema possui 34 barras, porém desprezando a primeira e a última sobram 32 barras, tal número pode ser representado por 5 *bits* (o motivo de desprezar tais barras foi com o intuito de simplificar a codificação). Logo, cada cromossomo possui o tamanho de 36 *bits*, sendo que os 20 primeiros representam as barras, enquanto que os outros 16 representam os valores dos bancos fixos e chaveados.

A Tabela 2 mostra os parâmetros e os operadores genéticos utilizados para a simulação do sistema de 34 barras. Várias simulações foram realizadas de forma a escolher os melhores parâmetros, depois de tais simulações chegou-se aos valores mostrados na tabela 2.

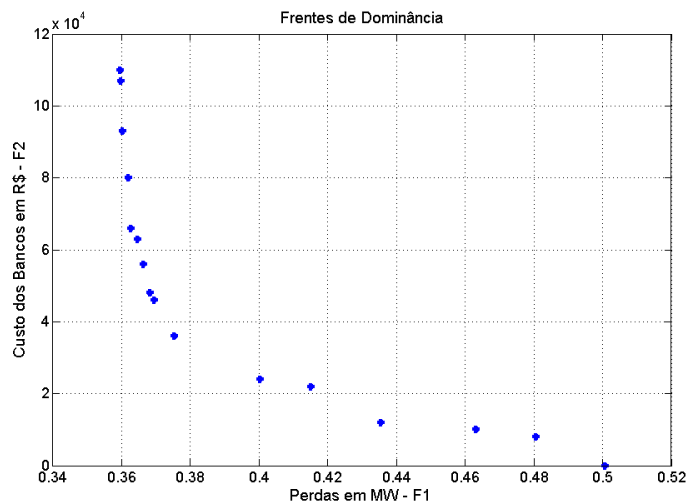
Tabela 2: Parâmetros da Simulação para o sistema de 34 barras

Tamanho da população	100 indivíduos
População inicial	Aleatória
Seleção	Torneio: 3 indivíduos
Cruzamento	Uniforme: $P_c = 0,88$
Mutação	$P_m = 0,01$
Critério de Parada	Nº de Gerações: 800

Fonte: Autoria própria.

Várias simulações foram realizadas, com o objetivo de obter a melhor frente de Pareto. Na Figura 3 é possível observar que o NSGA-II obteve uma boa distribuição das soluções no espaço de busca. O resultado dispõe de soluções bem espaçadas na curva de Pareto.

Figura 3: Curva de Pareto – Sistema IEEE 34 barras.

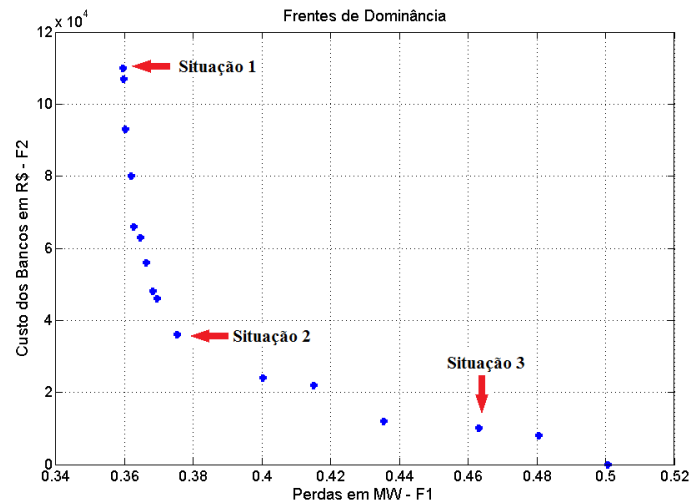


Fonte: Autoria própria

Através das soluções apresentadas na curva de Pareto, o *projetista* pode escolher a solução que mais se adequa a sua situação, considerando variáveis técnicas e financeiras. Por exemplo, caso a disponibilidade financeira inicial da empresa seja alta, então uma solução com maior redução de perdas, e conseqüentemente mais gastos financeiros devido ao custo dos bancos, pode ser a escolhida. Caso a empresa não tenha tal disponibilidade, uma solução mais barata pode ser escolhida.

Neste artigo, 3 diferentes situações foram contempladas. Na situação 1, a empresa apresenta uma boa disponibilidade financeira, portanto, a opção com a maior redução de perdas será analisada. Na situação 3, a empresa apresenta uma pequena disponibilidade financeira, portanto, uma opção com menos gastos será analisada. Já a situação 2 apresenta uma realidade intermediária, portanto, uma solução intermediária será analisada. Na Figura 4 é possível observar as 3 situações analisadas.

Figura 4: Diferentes soluções escolhidas na Curva de Pareto.



Fonte: Autoria própria

5.1 SITUAÇÃO 1

A tabela 3 apresenta os valores dos bancos que foram alocados, bem como as barras que receberam estes bancos. Lembrando que os bancos fixos estão presentes todo o tempo, isto é, no momento de carga leve e no momento de carga pesada. Enquanto que os bancos chaveados estão presentes apenas no momento de carga pesada. É interessante observar que vários BCs foram alocados, tanto fixos quanto chaveados.

Tabela 3: Bancos de Capacitores Instalados na Situação 1

Barra	Alocação (kvar)
4	600 (Fixo) e 300 (Chaveado)
9	600 (Fixo) e 150 (Chaveado)
19	600 (Fixo) e 300 (Chaveado)
24	600 (Fixo) e 150 (Chaveado)

Fonte: Autoria Própria.

A tabela 4 apresenta o valor das perdas técnicas com e sem a presença de BCs. Pode-se observar que a redução foi bastante significativa. O valor gasto nos BCs para obter tal redução foi de R\$110,000.00 (cento e dez mil reais).

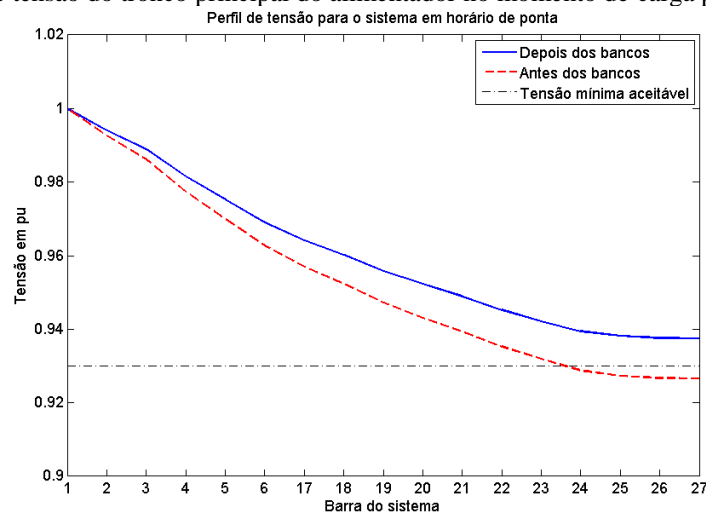
Tabela 4: Perdas Técnicas – Antes e Depois dos BCs - Situação 1

	Perdas Técnicas (MW)	Redução das Perdas (%)
Antes dos BCs	0,5007	28,18
Depois dos BCs	0,3596	

Fonte: Autoria Própria

A partir das simulações foi possível notar um aumento do nível de tensão nas barras para as duas condições de carga, o que consequentemente resultou em menores perdas ativas, como visto na tabela 4. Apresentam-se na figura 5, os perfis de tensão do tronco do alimentador de 34 barras no momento de pico. Observa-se que a compensação reativa contribui consideravelmente para manter as tensões de barra dentro da faixa admissível.

Figura 5: Perfil de tensão do tronco principal do alimentador no momento de carga pesada – situação 1.



Fonte: Autoria própria

5.2 SITUAÇÃO 2

A tabela 5 apresenta os valores dos bancos que foram alocados, bem como as barras que receberam estes. É interessante observar que na situação em questão, nenhum banco chaveado foi alocado, devido ao alto custo destes.

Tabela 5: Bancos de Capacitores Instalados na Situação 2

Barra	Alocação (kvar)
10	600 (Fixo)
20	600 (Fixo)
24	600 (Fixo)

Fonte: Autoria Própria.

A tabela 6 apresenta o valor das perdas técnicas com e sem a presença de BCs. Pode-se observar que a redução foi bastante significativa, porém, menor que na situação 1. Já o valor gasto nos BCs para obter tal redução foi de R\$36,000.00 (trinta e seis mil reais), valor bem inferior ao gasto na situação 1.

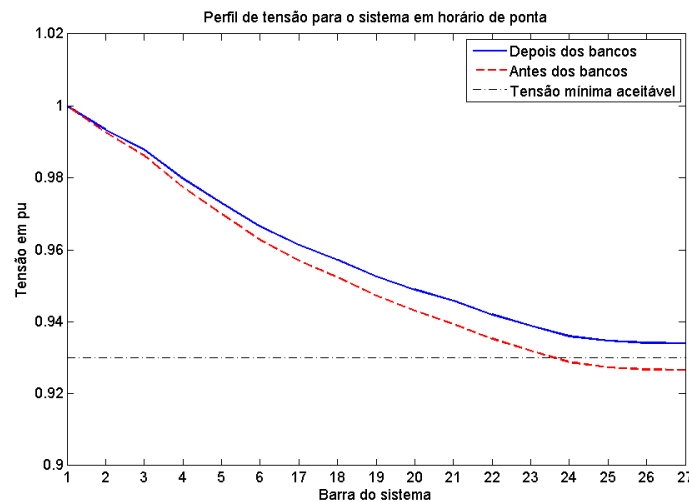
Tabela 6: Perdas Técnicas – Antes e Depois dos BCs - Situação 2

	Perdas Técnicas (MW)	Redução das Perdas (%)
Antes dos BCs	0,5007	25,04
Depois dos BCs	0,3753	

Fonte: Autoria Própria

Da mesma forma que na situação 1, é possível observar que a alocação dos bancos de capacitores proporcionou um aumento no nível de tensão das barras, o que resultou em uma redução nas perdas ativas, como visto na tabela 6. Na figura 6, apresentam-se os perfis de tensão do tronco do alimentador de 34 barras no momento de pico. Mesmo com menos bancos alocados, quando comparado com a situação 1, a violação do limite de tensão foi resolvida.

Figura 6: Perfil de tensão do tronco principal do alimentador no momento de carga pesada – situação 2.



Fonte: Autoria própria

5.3 SITUAÇÃO 3

A tabela 7 apresenta o valor do banco que foi alocado, bem como a barra que recebeu este. É interessante observar na situação em questão, nenhum banco chaveado foi alocado, devido ao alto custo destes. Além disso, apenas um banco fixo foi instalado. Isso acontece porque tal solução está próxima de um extremo da fronteira de Pareto.

Tabela 7: Banco de Capacitor Instalado na Situação 3

Barra	Alocação (kvar)
25	300 (Fixo)

Fonte: Autoria Própria

A tabela 8 apresenta o valor das perdas técnicas com e sem a presença de BCs. Pode-se observar que a redução foi bem menor, quando comparado as duas situações anteriores. Já o valor gasto no BC para obter tal redução foi de R\$10,000.00 (dez mil reais), valor bem inferior ao gasto nas situações anteriores.

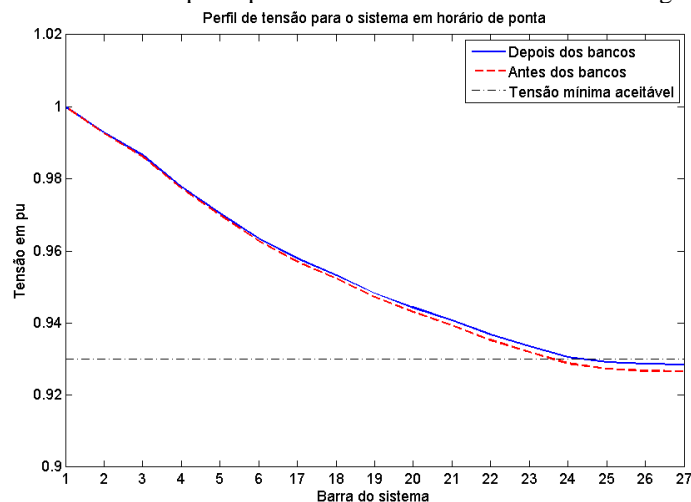
Tabela 8: Perdas Técnicas – Antes e Depois do BC - Situação 3

	Perdas Técnicas (MW)	Redução das Perdas (%)
Antes dos BCs	0,5007	7,51
Depois dos BCs	0,4631	

Fonte: Autoria Própria

Através da tabela 8, é possível observar que a redução das perdas técnicas foi bem inferior às encontradas nas situações 1 e 2, tal resultado é bastante compreensível, visto que apenas um banco de capacitor foi alocado. Apresentam-se na figura 7, os perfis de tensão do tronco do alimentador de 34 barras no momento de pico. É importante observar que na situação em questão, o problema da violação de tensão não foi resolvido.

Figura 7: Perfil de tensão do tronco principal do alimentador no momento de carga pesada – situação 3.



Fonte: Autoria própria

5.4 COMPARAÇÃO ENTRE AS 3 SITUAÇÕES

Como citado anteriormente, a possível solução a ser escolhida vai depender de questões financeiras e técnicas. A tabela 9 apresenta os valores dos custos e das reduções para as 3 situações escolhidas. A situação que apresentou um maior equilíbrio técnico-financeiro foi a situação 2.

Tabela 8: Comparação entre as três situações escolhidas

	Custos (R\$)	Redução das Perdas (%)
Situação 1	110.000,00	28,18
Situação 2	36.000,00	25,04
Situação 3	10.000,00	7,51

Fonte: Autoria Própria.

6 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos nas simulações são animadores e demonstraram que o problema de alocação de bancos de capacitores possui soluções variadas, a robustez do algoritmo tem como maior benefício a diversidade das soluções encontradas, desta forma, é possível obter um conjunto diversificado de possíveis soluções técnicas e financeiras.

Os resultados para o sistema de 34 barras foram bastante satisfatórios, pois as perdas foram reduzidas e o perfil de tensão foi melhorado depois da alocação dos bancos de capacitores. A depender da solução escolhida na frente de Pareto, as perdas ativas podem ser reduzidas em até 28,18% para o problema em questão.

Dentre as situações (possíveis soluções) apresentadas, a situação que apresentou um maior equilíbrio técnico-financeiro foi a segunda. Visto que a redução das perdas foi bastante significativa (25,04%) com um investimento relativamente baixo (R\$36.000,00).

As simulações foram realizadas diversas vezes, o NSGA-II demonstrou homogeneidade e coerência na busca pelas soluções do problema, a diversidade de soluções demonstrou que o algoritmo efetuou a busca de forma correta.

REFERÊNCIAS

ARROYO, José Elias Cláudio et al. Heurísticas e metaheurísticas para otimização combinatória multiobjetivo. **Biblioteca Digital da Unicamp**, p. 16, 2002.

BEÊ, Rafael Terplak. Alocação de Bancos de Capacitores em Sistema de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando Algoritmos Genéticos. **Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná**, 2007.

BORDIM, João Ricardo Graminha. **Instalação de Bancos de Capacitores em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica para Correção de Fator de Potência e Regulação de Tensão: Projeto e Simulação Computacional**. Monografia. Universidade de São Paulo-Escola de engenharia de São Carlos-Departamento de engenharia elétrica, 2011.

DEB, Kalyanmoy et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. **IEEE transactions on evolutionary computation**, v. 6, n. 2, p. 182-197, 2002.

DE SOUZA, Benemar Alencar; DE ALMEIDA, Angelo Márcio Formiga. Multiobjective optimization and fuzzy logic applied to planning of the volt/var problem in distributions systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 25, n. 3, p. 1274-1281, 2010.

DIREITO, Luiz Carlos Menezes. **Alocação Ótima de bancos de capacitores em redes de distribuição de energia elétrica**. 2010. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Fluminense.

FEEDERS, Radial Distribution Test. Ieee distribution planning working group report. **IEEE Trans. Power Syst**, v. 6, n. 3, p. 975-985, 1991.

GODOI, Adelino Anderson et al. **Alocação de bancos de capacitores em redes primária e secundária de energia elétrica**. 2009.

MICHEL, André Bernardes. **Alocação de bancos de capacitores e reguladores de tensão usando otimização por metas considerando geração distribuída**. 2015.

SOUSA, Andréa Araújo; ALMEIDA, Angelo Márcio F.; CARVALHO, C. S. Modelo do dispositivo FACTS STATCOM para o método da soma de potências. In: **CBQEE, XI Conferência Brasileira de Qualidade de Energia Elétrica. Campina Grande**. 2015.

SUNDHARARAJAN, Srinivasan; PAHWA, Anil. Optimal selection of capacitors for radial distribution systems using a genetic algorithm. **IEEE transactions on Power Systems**, v. 9, n. 3, p. 1499-1507, 1994.

SZUVOVIVSKI, ITAMAR. Alocação simultânea de bancos de capacitores e reguladores de tensão em sistemas de distribuição usando algoritmos genéticos e fluxo de potência ótimo. **Mestre em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Engenharia Elétrica, Curitiba**, 2008.