

Uma Meta-heurística Híbrida para Alocação Ótima de Bancos de Capacitores no Sistema de Distribuição de Energia Elétrica

Luís Miguel Magalhães Torres
Instituto Federal do Maranhão - IFMA
São Luís, Maranhão, Brasil
E-mail: luismigueltorres71@yahoo.com.br

Helton do Nascimento Alves
Instituto Federal do Maranhão - IFMA
São Luís, Maranhão, Brasil
E-mail: helton@ifma.edu.br

Abstract—Uma meta-heurística híbrida baseada em Algoritmo Genético e Recozimento Simulado é proposta para alocação de reativos em redes de distribuição na presença de correntes e tensões com distorções harmônicas. A função objetivo considera a economia com a redução de perdas de potência e de energia e os investimentos associados com os capacitores fixos e chaveados. Também são considerados restrições de amplificação de distorções harmônicas, de tensão de barra. O algoritmo proposto é aplicado em um alimentador de 34 barras. Os resultados indicam a eficiência do método proposto.

Keywords—Algoritmo Genético, Recozimento Simulado, Sistema de Distribuição de Energia Elétrica, Banco de Capacitores.

I. INTRODUÇÃO

A compensação reativa em redes de distribuição é um problema típico de otimização de grande importância técnica e econômica que vem sendo enfrentado ao longo de cinco décadas. De uma forma geral, o problema da compensação reativa consiste na determinação do número, da localização, do tamanho, tipo, e tempos de chaveamentos dos bancos de capacitores a serem instalados no sistema, de forma que o máximo benefício seja alcançado para diferentes níveis de carga respeitando as restrições operacionais impostas. A extensão dos benefícios da instalação de bancos de capacitores depende da configuração da rede elétrica e de suas condições de carga. O lucro líquido corresponde ao montante que se economiza ao reduzirem-se as perdas depois de abatido o investimento na aquisição, instalação e manutenção dos equipamentos necessários.

Devido à presença cada vez maior de distorções harmônicas no sistema elétrico, existe a necessidade de avaliar o impacto da instalação de banco de capacitores em relação a essa distorção, pois existe uma preocupação de que, se não adequadamente dimensionados e colocados ao longo do alimentador, capacitores shunt podem amplificar correntes harmônicas e tensões devido a possíveis ressonâncias em uma ou várias frequências harmônicas [1].

Os métodos de solução do problema da compensação reativa são diversificados e evoluem em conformidade com os recursos computacionais disponíveis. Em [2] esses métodos são classificados em quatro grupos: analíticos, de programação

matemática, heurísticos e baseados em linguagem de inteligência artificial. Dentre esses se destacam os baseados em linguagem de inteligência artificial devido à grande facilidade de se ajustarem ao problema de compensação reativa. Como exemplo se tem os trabalhos de [3] que utiliza *simulated annealing*, em [4] é utilizado lógica *fuzzy*, em [5] é utilizado algoritmo genético, [6] utiliza *ant colony*, [7] utiliza sistemas imunológicos artificiais, entre outros.

Neste trabalho se propõe um método de otimização híbrido baseado em Algoritmo Genético e Recozimento Simulado para dimensionamento, localização e controle de bancos de capacitores em redes de distribuição na presença de distorções harmônicas. O objetivo do algoritmo é maximizar a redução das perdas de potência ativa e de energia elétrica, além de melhorar o perfil de tensão no alimentador, respeitando as restrições de distorção harmônica e de tensão de barra e obedecendo aos limites definidos por normas internacionais. A formulação apresentada maximiza os ganhos com a alocação de bancos considerando a redução de potência e energia e os custos de aquisição, instalação, e manutenção das unidades instaladas. A distorção de tensão harmônica total e a regulação da tensão dentro das faixas definidas como adequadas são restrições à solução ótima encontrada. Outros parâmetros que são considerados são o horizonte de planejamento, a taxa de crescimento anual da carga do alimentador em estudo.

II. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

De uma forma geral, o problema de alocação de bancos de capacitores consiste na determinação do número, localização, tamanho, tipo e tempos de chaveamento dos bancos de capacitores a serem instalados no sistema de forma que o máximo benefício seja alcançado para diferentes níveis de carga respeitando as restrições operacionais impostas.

A. Compensação Reativa

Um dos meios mais eficientes de reduzir as perdas no sistema de distribuição é a compensação reativa através da aplicação de bancos de capacitores em derivação. Sem dúvida, a localização mais adequada dos bancos de capacitores é na carga que se deve compensar. Os grandes e médios consumidores industriais são responsabilizados pela compensação reativa das suas cargas e por isso, precisam instalar bancos

junto às cargas a fim de evitar fatores de potência baixos. Resta às concessionárias de energia elétrica compensar as cargas dos pequenos consumidores e complementar à compensação dos consumidores médios. O planejamento da compensação reativa consiste na determinação da capacidade, localização e tempo de operação ótimo para maximizar a redução de perdas e consequentemente a economia líquida.

B. Distorção Harmônica

Devido ao aumento da presença de cargas não lineares no sistema de distribuição, as tensões e correntes harmônicas se propagam cada vez mais no sistema. A presença de distorções harmônicas é indesejável, pois causam efeitos negativos em diversos equipamentos elétricos, entre eles estão o sobreaquecimento, erros de medição e erro de controle de conversores. A alocação de bancos de capacitores *shunt* se não adequadamente planejada pode causar a ressonância em uma ou mais frequências harmônicas entre os elementos capacitivos e indutivos do sistema o que pode amplificar correntes e tensões harmônicas.

O indicador para se avaliar os índices de distorção harmônica é a distorção de tensão harmônica total (DTHT). Entende-se por DTHT a raiz quadrada do somatório quadrático das tensões harmônicas [8]. Esse conceito procura quantificar o conteúdo harmônico total existente em uma determinada barra da rede.

$$DTHT = 100 * \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^n V_k^2}}{V_1} \quad (1)$$

Sendo,

V_h : tensão harmônica de ordem h em volts.
 V_1 : tensão à frequência fundamental em volts.

São determinados limites para os níveis de DTHT no sistema de distribuição de energia elétrica. Na norma IEEE 512-1992 [9] esses valores são estabelecidos para uma tensão de barra maior que 1kV e menor ou igual a 13,8kV em que para estes valores a DTHT máxima no barramento deve ser de 5%.

Para o estudo do sistema é necessário um fluxo de carga que abranja, além da frequência fundamental, as frequências harmônicas. Em [10] é feito uma abordagem geral sobre os métodos de fluxo de carga harmônica. Métodos diretos de solução podem ser aplicados na análise harmônica, nos casos em que as fontes harmônicas são desacopladas umas das outras, ou seja, quando uma fonte não é dependente de outras fontes do sistema. Os métodos diretos de solução mais comuns são os da varredura de frequência e o método de injeção de corrente. Os métodos iterativos apresentam uma maior precisão em relação aos métodos diretos. Neles são considerados os efeitos do acoplamento harmônico, dando assim uma maior precisão ao método.

C. Função Objetivo

A função objetivo a ser maximizada representa a economia obtida com a instalação dos bancos de capacitores no alimentador. Os capacitores fixos são instalados no sistema

de distribuição de energia elétrica para operarem permanentemente durante todo o ciclo de carga, de modo a compensar o nível de carga reativa mais baixa (leve), enquanto que capacitores chaveados são programados para operar em intervalos regulares, de modo a complementar à compensação dos capacitores fixos até o nível máximo de carga reativa. Normalmente os bancos de capacitores têm capacidade que são múltiplos inteiros de uma unidade padrão (50 150 ou 300 kVar, por exemplo). Além disso, os pontos de instalação possíveis são as barras do alimentador e, portanto, também formam um conjunto finito. Assim, o problema é notadamente de otimização combinatória, cuja função objetivo pode ser expressa do seguinte modo, considerando a curva de duração de carga segmentada em m níveis:

$$f(s) = \sum_{h=1}^a k_p (P_{o_m}^h(s) - P_{c_m}^h(s)) + \sum_{h=1}^a \sum_{j=1}^m (P_{o_j}^h(s) - P_{c_j}^h(s)) * k_{e_j} * \Delta t_j - C(n_f(s) * k_f + n_c(s) * k_c) \quad (2)$$

Sendo,

s: um conjunto de parâmetros que definem os pontos de instalação e os controles dos bancos de capacitores;
 k_p : custo da perda de potência de pico (\$/kW);
m: níveis de carga em que a curva de duração é segmentada;
j: nível de carga da mais leve até o pico;
 k_{e_j} : custo da perda de energia em cada nível (\$/kWh);
 k_f : o custo do banco de capacitores fixos (\$/kVar) que pode agregar os custos do capital, de mão de obra, peças, acessórios e manutenção;
 k_c : o custo do banco de capacitores chaveados (\$/kVar) que pode agregar os custos do capital, de mão de obra, peças, acessórios e manutenção;
C: potência de módulo de banco de capacitor (kVar);
 n_f : o número de bancos de capacitores fixos, cada um de capacidade C;
 n_c : o número de bancos de capacitores chaveados, cada um de capacidade C;
a: horizonte de planejamento (anos);
h: um ano qualquer dentro do horizonte de planejamento (h=1...a);
 $P_{o_j}^h$: perdas de potência no alimentador original em cada nível j no ano h (kW);
 $P_{c_j}^h$: perdas de potência em cada nível j do ano h com os bancos alocados (kW);
 Δt_j : duração anual de cada nível de carga (j=1...m), em horas.

A solução obtida deve respeitar os níveis de tensão que é estabelecido em [11] e o limite de DTHT definido em [9], as soluções (s) que não satisfizerem essas condições são penalizadas de modo a não predominarem durante o processo de otimização. Uma solução qualquer do problema (não necessariamente ótima) é definida por um conjunto de valores s, correspondentes à localização e capacidade dos bancos ligados durante o tempo correspondente à duração de carga de cada nível. A solução de interesse para o problema de compensação reativa é aquela para a qual o valor da equação (2) seja máximo, sujeito à restrição de tensão e DTHT (1).

D. Algoritmo Genético

Os algoritmos genéticos, propostos por Holland [12], são inspirados na evolução das espécies, segundo a teoria de Darwin. Com base nos postulados dessa teoria, Holland desenvolveu algoritmos que tem como base a codificação genética e que busca simular o processo de evolução. O objetivo final do algoritmo é encontrar o indivíduo mais forte e mais adaptado ao ambiente em que se encontra através de cruzamentos e mutações em uma determinada população.

Esses algoritmos são simples, robustos, flexíveis e capazes de localizar a solução ótima global. Eles são particularmente úteis na solução de problemas em que outras técnicas de otimização apresentam dificuldades [13]. A desvantagem dos algoritmos genéticos é o elevado tempo de processamento. Isso se deve à sua concepção evolutiva, que é um processo aleatório e normalmente demorado. Entretanto, meios de atenuar esse problema já foram propostos, tais como uma escolha mais apropriada de como codificar as soluções e a redução do espaço de busca por meio do conhecimento especialista.

Um algoritmo genético básico compreende a criação aleatória da população inicial e um ciclo de três estágios:

- Avaliação de cada cromossomo;
- Seleção dos cromossomos para reprodução;
- Manipulação genética para criar a nova população.

Cada vez que esse ciclo se completa é dito que ocorreu uma geração. A seleção dos cromossomos para reprodução é efetuada por mecanismos aleatórios. Além disso, o critério de sobrevivência é baseado em uma função objetivo que avalia a adaptação de cada cromossomo da população às condições ambientais.

Nos algoritmos genéticos inicialmente, um grupo de soluções possíveis é codificado aleatoriamente para formar a população inicial. Geralmente o tamanho da população não varia no decorrer das gerações. A cada geração são criados novos cromossomos a partir da população já existente e os componentes desta população podem ser substituídos pelos novos de acordo com a sua função aptidão e com a técnica de elitismo empregada.

A maioria dos algoritmos genéticos produz resultados ruins quando as populações são pequenas, pois são processadas informações insuficientes sobre o problema e em decorrência a convergências prematuras para ótimos locais. Geralmente o tamanho da população varia de 30 a 300 indivíduos.

E. Recozimento Simulado

O algoritmo de Recozimento Simulado, no inglês *Simulated Annealing*, é uma meta heurística que se baseia no processo de recozimento de sólidos [14], proposta inicialmente em [15] sendo um método de busca local que aceita movimentos de piora com o objetivo de escapar de ótimos locais.

A função objetivo representa a energia do sistema, caso a nova solução obtida possua um valor de função objetivo pior que o da solução atual a possibilidade dessa solução ser aceita é definida pela equação (3):

$$p = e^{-\frac{\Delta F}{T}} \quad (3)$$

Sendo ΔF e T , respectivamente, a variação do valor função objetivo obtido entre a solução atual e a nova solução encontrada e a temperatura do sistema na iteração corrente. Outros parâmetros importantes são a temperatura inicial (T_o), temperatura final (T_f), taxa de decaimento da temperatura (α). O algoritmo pode ser descrito basicamente como os seguintes passos:

- 1) Inicialização dos parâmetros do algoritmo;
- 2) Criação de uma solução inicial e defini-la como solução atual;
- 3) Cálculo da função aptidão da solução inicial;
- 4) Perturbação da solução atual para obtenção da nova solução;
- 5) Cálculo da função aptidão da nova solução;
- 6) Verificar se a nova solução será aceita utilizando a (3);
- 7) Atualizar a temperatura;
- 8) Caso as condições de parada não sejam satisfeitas, retornar a ao passo 4;
- 9) Fim do algoritmo.

No processo de busca, o SA possui a vantagem de poder convergir para ótimos globais caso a temperatura inicial (T_o) seja grande o suficiente, e se a velocidade com que decai a temperatura é lenta o bastante [16], mas nesse caso tempo necessário para se encontrar a solução é consideravelmente degradado.

III. METODOLOGIA PROPOSTA

Para se encontrar a solução ótima do problema da compensação reativa conforme formulado anteriormente, se propõe uma técnica de otimização híbrida combinando Algoritmo Genético e Recozimento Simulado. O propósito desta técnica é combinar a robustez e a flexibilidade do Algoritmo Genético, conforme descrito na seção anterior, e a capacidade de fazer as soluções escaparem de ótimos locais do Recozimento Simulado. Desta forma pode-se trabalhar com uma população menor sem o risco de uma convergência precoce, portanto reduzindo-se o esforço computacional para encontrar uma solução de boa qualidade.

O algoritmo compreende os seguintes passos:

- 1) Calcular as tensões de barra, as perdas de potência e perdas de energia no alimentador com a configuração original, ou seja, sem os capacitores que se cogitam instalar;
- 2) Adotar a economia líquida expressa pela equação (2) como função de aptidão (*fitness*);
- 3) Gerar aleatoriamente uma população inicial de tamanho P;
- 4) Escolher uma porcentagem da população gerada inicialmente para ser otimizada através do algoritmo de Recozimento Simulado;
- 5) Determinar o índice de adaptação de cada cromossomo;
- 6) Aplicar penalidade ao cromossomo caso as restrições impostas não sejam respeitadas;

- 7) Escolher m cromossomos da população atual utilizando o método da roleta;
- 8) Fazer o cruzamento de pares de cromossomos desse subconjunto;
- 9) Calcular os índices de adaptação dos novos cromossomos;
- 10) Aplicar penalidade ao cromossomo caso as restrições impostas não sejam respeitadas;
- 11) Escolher uma nova população de tamanho P entre a população atual e os novos cromossomos considerando os cromossomos mais adaptados.
- 12) Caso em um número pré-estabelecido de gerações não ocorra uma melhora da melhor solução encontrada, escolher uma porcentagem da população para ser otimizada através do algoritmo de Recozimento Simulado;
- 13) Repetir os passos 7 a 12 h vezes ou até a população ter um grau de homogeneidade pré-estabelecida.
- 14) Fim do Algoritmo

Para a modelagem da resposta foi utilizada uma curva de duração segmentada em 3 níveis, podendo facilmente ser ajustada para uma quantidade de níveis quaisquer. O algoritmo utiliza um vetor de bytes de tamanho B (número de barras do alimentador com exceção da barra da subestação) como cromossomo e as suas informações são codificadas no alfabeto binário. Cada barra é representada por um byte onde os dois bits mais baixos são relativos ao nível de carga de pico, os três subsequentes ao nível de carga intermediário e os três restantes ao nível de carga leve. Um exemplo do cromossomo é mostrado na figura 1. Na barra 1 não existem bancos; na barra 2 há dois bancos chaveados na carga intermediária e três bancos chaveados na carga de pico.

Barra 1			Barra 2			...	Barra B		
1	2	3	1	2	3	...	1	2	3
0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 1 0	0 1 1	...	0 1 0	1 0 1	0 0 1

Fig. 1. Estrutura cromossômica.

O fluxo de potência harmônico utilizado é do tipo direto baseado em injeção de corrente. Esse método foi escolhido pela sua simplicidade, além disso, verifica-se que as simplificações adotadas no seu desenvolvimento produzem distorções harmônicas mais elevadas do que nos métodos iterativos, o que traz uma margem maior de segurança na avaliação do efeito da alocação dos bancos de capacitores na DTHT. O número m de cromossomos escolhidos para cruzamento é preestabelecido. Também são definidos por antecipação g e v.

IV. RESULTADOS OBTIDOS

A metodologia proposta foi aplicada em um alimentador radial trifásico primário de 34 barras com tensão de linha na subestação de 11 kV [17], dados de linha e de carga estão na Tabela III e os dados das cargas não lineares presentes no alimentador estão nas Tabelas I e II. As cargas foram consideradas equilibradas e ligadas em delta. Os módulos de bancos de capacitores instalados são de 300 kVar e foi imposto

um limite de 3 módulos por nível e um limite de 16 módulos em todo o alimentador. Na Tabela IV temos a divisão da curva de carga e os valores dos custos de perda de potência e energia. Foi considerado um planejamento de 5 anos, com taxa anual de crescimento de 5%, as soluções a serem obtidas devem respeitar as restrições impostas em todo o período de planejamento.

TABELA I. LOCALIZAÇÃO E POTÊNCIA DAS CARGAS NÃO LINEARES INSTALADAS

Barra	P(kW)	Q(KVAr)	Tipo
6	675	439	1
24	675	439	1
11	350	175	2
16	350	175	2

TABELA II. ESPECTRO HARMONICO DAS CARGA NÃO LINEARES

Ordem Harmônica	Tipo 1		Tipo 2	
	Amplitude (%)	Fase (°)	Amplitude (%)	Fase (°)
1	100	0	100	0
5	23.52	111	82.8	-135
7	6.08	109	77.5	69
11	4.57	-158	46.3	-62
13	4.2	-178	41.2	139
17	1.8	-94	14.2	9
19	1.37	-92	9.7	-155
23	0.75	-70	1.5	-158
25	0.56	-70	2.5	98
29	0.49	-20	0	0
31	0.54	7	0	0

TABELA III. DADOS DE LINHA E DE CARGAS LINEARES DO ALIMENTADOR UTILIZADO

Seção	De	Para	R (Ω)	X (Ω)	Cargas Lineares	
					P (MW)	Q (MVar)
0	1		0,0967	0,0397	0,23	0,1425
1	2		0,089	0,0364	0	0
2	3		0,1359	0,0377	0,23	0,1425
2	4		0,1299	0,0223	0,072	0,045
3	5		0,1236	0,0343	0,23	0,1425
4	6		0,1732	0,0298	0,072	0,045
5	7		0,1236	0,0343	0	0
6	8		0,0866	0,1488	0,072	0,045
7	9		0,2598	0,0446	0	0
7	10		0,1483	0,0412	0,23	0,1425
8	11		0,0433	0,0074	0,0135	0,0075
9	12		0,1732	0,0298	0,23	0,1425
9	13		0,1299	0,0223	0,075	0,048
10	14		0,1359	0,0377	0,23	0,1425
12	15		0,2598	0,0446	0,23	0,1425
13	16		0,1299	0,0223	0,075	0,048
14	17		0,1728	0,0391	0,23	0,1425
15	18		0,1732	0,0298	0	0
17	19		0,1562	0,0355	0,23	0,1425
16	20		0,1299	0,0223	0,075	0,048
18	21		0,1083	0,0186	0,23	0,1425
18	22		0,1299	0,0223	0,057	0,0345
19	23		0,1562	0,0355	0,23	0,1425
22	24		0,1732	0,0298	0,057	0,0345
23	25		0,2165	0,0372	0,23	0,1425
21	26		0,0866	0,1488	0,137	0,084
24	27		0,1299	0,0233	0,057	0,0345
25	28		0,2165	0,0372	0,23	0,1425
28	29		0,2598	0,0446	0,23	0,1425
27	30		0,0866	0,1488	0,057	0,0345
29	31		0,1732	0,0298	0,23	0,1425
31	32		0,1083	0,0186	0,23	0,1425
32	33		0,0866	0,1488	0,137	0,084

O resultado do método proposto neste trabalho foi comparado com o resultado obtido através de um algoritmo genético e da meta-heurística *simulated annealing*. No Algoritmo Genético a população é de 200 cromossomos, com

TABELA IV. DADOS RELATIVOS AOS NÍVEIS DE CARGA E DO CUSTO DAS PERDAS DE ENERGIA E POTÊNCIA

Nível de Carga			Custo perda de energia (\$/kWh)			Custo perda de potência de pico (\$/kW)
1	2	3	1	2	3	300
0.9	0.5	0.3	2.95	1.78	0.7	
1000 h	6760 h	1000 h				

taxas de cruzamento e mutação de 100% e 1% respectivamente, o grau de homogeneidade utilizado é de 99% e o número limite de gerações utilizado é de 200. No Recozimento Simulado a temperatura inicial e final são de 3000 °C e 25 °C respectivamente, a taxa de decaimento da temperatura escolhida foi de 0.9. No método proposto foram utilizados 100 cromossomos, com taxas de cruzamento e mutação de 100% e 2% respectivamente, grau de homogeneidade de 100%, número limite de gerações de 200, a temperatura inicial é de 1500 °C, a temperatura final é de 25 °C e a taxa de decaimento da temperatura de 0.8.

Os resultados obtidos com o algoritmo proposto e com as técnicas utilizadas como comparação, bem como as configurações ótimas definidas por cada método estão na Tabela V. O tempo de execução do algoritmo genético de aproximadamente 117 minutos, o do Recozimento Simulado é de 2.4 minutos e o tempo de execução do algoritmo híbrido proposto é de 68.3 minutos. O algoritmo proposto obteve um tempo de execução intermediário comparado com as duas técnicas de referência, mas obteve um resultado melhor que ambas. A metodologia proposta se mostrou eficiente obtendo um resultado melhor que ambas as técnicas de referência e com um tempo de execução intermediário entre as duas.

TABELA V. RESULTADOS OBTIDOS

Método Utilizado	Tempo de Execução (min.)	Barras com Bancos	Número de Módulos por Nível			Economia Líquida (\$)
			1	2	3	
Simulated Annealing	2,42	11	0	0	1	3.766.520,4
		20	0	2	0	
		23	1	0	0	
		27	0	0	1	
		32	0	3	0	
		6	0	0	1	
Genético	116,79	8	0	0	1	4.064.139,6
		9	0	0	1	
		22	1	0	0	
		23	0	0	2	
		24	0	0	2	
		32	1	0	0	
Algoritmo Proposto	68,34	33	0	0	1	4.107.944,7
		6	0	0	2	
		15	0	0	1	
		16	0	0	1	
		17	0	0	1	
		23	0	0	1	
24	1	0	1			
28	1	0	0			
33	0	0	1			

Na Figura 2 é mostrado o perfil de tensão do alimentador antes e após a alocação bancos de capacitores conforme determinado pelo algoritmo híbrido proposto, ambas no nível de carga de pico no último ano do planejamento. Percebe-se que em algumas barras houve elevação da tensão e em outras a tensão se manteve muito próximo ao seu valor original, mas sempre obedecendo à faixa de tensão estabelecida. A menor tensão de linha encontrada no alimentador original e com

bancos no último ano de planejamento para o nível de carga de pico foi respectivamente de 0.9221 p.u. e 0,9322 p.u.

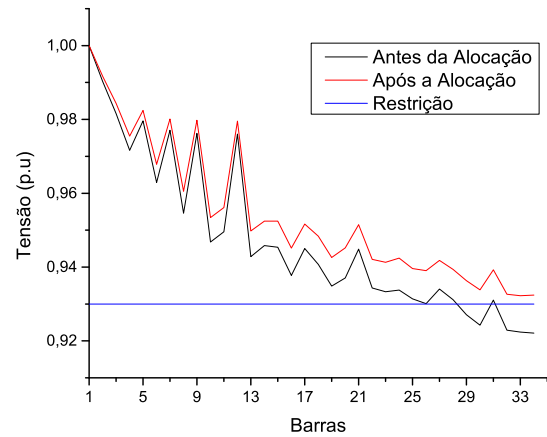


Fig. 2. Perfil de Tensão Antes e Após a Alocação.

Na Figura 3 são mostrados os valores de DTHT no alimentador no último ano do planejamento no nível de carga mais pesado antes e após a alocação prevista pelo método proposto. Observa-se que como previsto os níveis de DTHT aumentaram após a alocação em relação aos seus valores originais. O maior de DTHT antes e após a alocação foram respectivamente de 2.42 % na barra barra 20 e 4.01 % na barra 33.

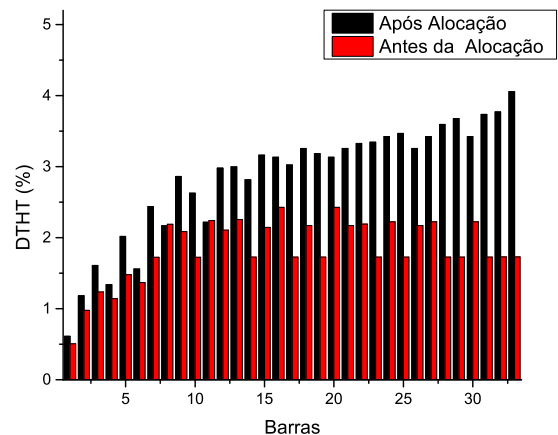


Fig. 3. Níveis de DTHT Antes e Após a Alocação.

V. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma metodologia híbrida entre Algoritmo Genético e Recozimento Simulado para a solução do problema de alocação ótima de bancos de capacitores no sistema de distribuição de energia elétrica na presença de cargas não lineares. Foi apresentada a formulação teórica do problema proposto e a metodologia de solução proposta.

Diante dos resultados obtidos, conclui-se que, com a metodologia proposta se mostrou eficiente para a solução do

problema de alocação ótima de banco de capacitores na rede distribuição na presença de cargas não lineares, obtendo um resultado superior as duas técnicas de referência e com um tempo de execução intermediário entre as duas.

Além disso pode-se concluir que a utilização de técnicas híbridas para a solução dos problemas de otimização presentes no sistema elétrico mostra-se eficiente, pois desta forma é possível combinar aspectos positivos de cada meta-heurística e superar problemas individuais de cada técnica.

REFERÊNCIAS

- [1] A. Eajal and M. El-Hawary, "Optimal capacitor placement and sizing in unbalanced distribution systems with harmonics consideration using particle swarm optimization," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 25, no. 3, pp. 1734–1741, July 2010.
- [2] H. Ng, M. Salama, and A. Chikhani, "Classification of capacitor allocation techniques," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 15, no. 1, pp. 387–392, Jan 2000.
- [3] T. Ananthapadmanabha, A. Kulkarni, A. G. Rao, K. R. Rao, and K. Parthasarathy, "Knowledge-based expert system for optimal reactive power control in distribution system," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 18, no. 1, pp. 27 – 31, 1996.
- [4] H. Alves, B. Souza, and H. Alves, "Banks of automatic capacitors in electrical distribution systems: a hybrid algorithm of control," *Sba: Controle & Automação*, vol. 16, pp. 93 – 99, 03 2005.
- [5] H. Alves, B. Souza, H. D. de Macedo Braz, and N. Kagan, "Optimal capacitor allocation in electrical distribution systems based on typical load profiles," in *Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2004 IEEE/PES*, Nov 2004, pp. 441–447.
- [6] C.-F. Chang, "Reconfiguration and capacitor placement for loss reduction of distribution systems by ant colony search algorithm," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 23, no. 4, pp. 1747–1755, Nov 2008.
- [7] R. Takehara and R. Romero, "Artificial immune systems applied to optimal capacitor placement in radial distribution networks," in *Transmission Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2006. TDC '06. IEEE/PES*, Aug 2006, pp. 1–7.
- [8] R. Dugan, M. McGranaghan, S. Santoso, and H. Beaty, *Electrical Power Systems Quality, Third Edition*. McGraw-Hill Education, 2012.
- [9] "Ieee recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems," *IEEE Std 519-1992*, pp. 1–112, April 1993.
- [10] S. Herraiz, L. Sainz, and J. Clua, "Review of harmonic load flow formulations," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 18, no. 3, pp. 1079–1087, July 2003.
- [11] *PRODIST Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica*, Agência Nacional de Energia Elétrica, Janeiro 2015.
- [12] J. H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control and Artificial Intelligence*. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1992.
- [13] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, 1st ed. Boston, MA, USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1989.
- [14] N. Metropolis, A. W. Rosenbluth, M. N. Rosenbluth, A. H. Teller, and E. Teller, "Equation of state calculations by fast computing machines," *The Journal of Chemical Physics*, vol. 21, no. 6, 1953.
- [15] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, and M. P. Vecchi, "Optimization by simulated annealing," *Science*, vol. 220, no. 4598, pp. 671–680, 1983. [Online]. Available: <http://www.sciencemag.org/content/220/4598/671.abstract>
- [16] X. Bai, H. Yang, L. Li, and H. Shu, "A chaos genetic simulated annealing hybrid algorithm," in *Grey Systems and Intelligent Services, 2009. GSIS 2009. IEEE International Conference on*, Nov 2009, pp. 1476–1479.
- [17] E. Fuchs and M. Masoum, *Power Quality in Power Systems and Electrical Machines*. Elsevier Science, 2011. [Online]. Available: <http://books.google.com.br/books?id=6M9Aho4XXwQC>