

An Evolutionary Algorithm for Application in Compensation of the Reactive Power in Electric Power Distribution

Alysson Roberto Azevedo¹, Manoel S. Santos Azevedo², Jandecy Cabral Leite³, Ubiratan Holanda Bezerra⁴, Ignacio Pérez Abril⁵

^{1,3}Instituto de Tecnologia e Educação Galileo da Amazônia (ITEGAM) – Av. Joaquim Nabuco, 1950, Centro, Manaus – AM.

²Universidade do Estado do Amazonas (UEA/EST) – Av. Darcy Vargas, 1200, Manaus – AM.

⁴Universidade Federal do Pará – Rua Augusto Côrrea, 01, Guamá, Belém – PA.

⁵Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Carretera a Camajuani, Kilometro 5, 50100, Santa Clara, Villa Clara – Cuba.

Email: manoelazevedo@yahoo.com.br, jandecy.cabral@itegam.org.br, bira@ufpa.br, iperez@uclv.edu.cu

Received: October 15th, 2017.

Accepted: October 26th, 2017.

Published: December, 13th, 2017.

Copyright ©2016 by authors and Institute of Technology Galileo of Amazon (ITEGAM). This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



ABSTRACT

This article has as general objective using the computational tool using computational intelligence based on genetic algorithms (AG), proposed by Azevedo (2015), for the optimization multiobjective of reactive power compensation in networks electrical distribution system capable of locating and the compensation units required to obtain the best economic benefits and the maintenance of indices of energy quality Brazilians, as well as to analyze the behavior in case study in a company of the Industrial Pole of Manaus (PIM).

Keywords: Genetic algorithms, Harmonics, Power quality, Electrical distribution, NSGA II.

Um Algoritmo Evolutivo para Aplicação na Compensação da Potência Reativa em Redes de Distribuição de Energia Elétrica

RESUMO

Este artigo tem como objetivo geral utilizar a ferramenta computacional utilizando técnicas de inteligência computacional apoiada em algoritmos genéticos (AG), proposta por Azevedo (2015), para a otimização multiobjetivo da compensação da potência reativa em redes elétricas de distribuição capaz de localizar e dimensionar de forma ótima as unidades de compensação necessárias para obter os melhores benefícios econômicos e a manutenção dos índices de qualidade da energia estabelecidos pelas normas brasileiras, bem como analisar o comportamento diante de um estudo de caso em uma empresa do Pólo Industrial de Manaus (PIM).

Palavras Chaves: X Algoritmos genéticos, Harmônicos, Qualidade de energia, Distribuição elétrica, NSGA II.

I INTRODUÇÃO

A compensação de potência reativa para sistemas de distribuição de energia elétrica é feito por seleção e instalação de bancos de capacitores em determinados pontos do circuito com o objetivo de reduzir custos operacionais anuais de tais sistemas.

Esta redução de custo é evidenciada por dois efeitos principais:

1) A redução das perdas de energia nos elementos série do circuito pela redução da potência reativa circulante às distintas horas do dia;

2) A diminuição das perdas de potência que ocorrem no horário de máxima carga, o que diminui a carga máxima e,

portanto, libera capacidade elétrica em ditos elementos em série. A estrutura do modelo de carga tem um grande impacto sobre os resultados de análise de sistemas de potência [1][2]. Tem sido observado que os diferentes modelos de carga levará a várias, até mesmo conclusões contraditórias sobre a estabilidade do sistema [3][4].

Desta maneira, em um circuito com a presença de harmônicos, a combinação mais econômica de localização e seleção dos bancos de capacitores considerando somente os resultados econômicos a frequência fundamental, pode incrementar os índices de distorção por harmônicos e, portanto, ser inviável do ponto de vista da qualidade de energia quando se

considera o efeito de grandes alterações para todas as frequências de harmônicos existentes na rede.

Uma solução a esta situação seria considerar as restrições de qualidade de energia pertinentes ao problema, não obstante, para obter uma melhor avaliação das possíveis soluções ao problema e como estas influem sobre os indicadores de distorção por harmônicos da rede, pode incluir como objetivo adicional da otimização, a redução desta distorção. Sendo assim, diferentes métodos de otimização tem sido empregados para a seleção e localização de banco de capacitores em circuitos de distribuição que alimentam cargas lineares [5][6]. Algoritmos genéticos [5], [6][7], algoritmos de inteligência coletiva [8-10] e mesmo técnicas heurísticas [11-13] foram utilizadas para resolver várias formulações deste problema.

Desta forma, não se obtém somente uma solução ao problema, mas pode-se avaliar um conjunto de soluções que com benefícios econômicos semelhantes pudessem ter diferentes efeitos sobre os índices da qualidade de energia [14].

Outros meios compensadores da potência reativa mais adequados para circuitos com presença de harmônicos são os filtros passivos de harmônicos, os quais unem a sua ação de filtragem a injeção de potência reativa à rede. Estes filtros devem ser utilizados quando não se pode obter uma solução viável com bancos de capacitores ou se economicamente a solução com filtros é melhor [15].

II. MODELO MATEMÁTICO DO PROBLEMA

Tendo em vista os aspectos expostos, o presente trabalho formula o problema de otimização da compensação da potência reativa [16] em sistemas elétricos de distribuição como um problema multiobjetivo que busca a seleção e localização dos compensadores necessários para minimizar: 1) O custo dos equipamentos compensadores selecionados; 2) O custo de operação anual do sistema elétrico; 3) A distorção total da tensão nas barras do sistema elétrico.

O problema de otimização está sujeito às restrições de cumprimento: 1) As normas da qualidade de energia; 2) As normas de utilização dos equipamentos compensadores.

II.1 VARIÁVEIS DO PROBLEMA

As variáveis independentes do problema de otimização, representadas pelo arranjo x , são: o número, localização e parâmetros do projeto dos compensadores de potência reativa (bancos de capacitores ou filtros de harmônicos) a serem instalados no circuito.

Em um algoritmo genético, as características de um indivíduo (alteração de solução) se expressa pelo cromossomo que o define. A codificação das variáveis do problema no cromossomo do algoritmo genético realiza-se de acordo ao tipo de codificação que emprega a implementação computacional utilizada, bem como, codificação binária clássica ou outro tipo de codificação adequada para a representação das variáveis. Na maioria dos casos, é mais cômodo contar com um algoritmo que empregue uma codificação em números reais "real coded GA". Como um dos resultados que se quer obter é precisamente o número de compensadores a ser utilizado, o conjunto de dados que representam uma solução é de tamanho variável. Portanto, este cromossomo deve ser capaz de representar o número máximo de compensadores a serem utilizados. Uma vez definida suas

dimensões, o cromossomo fica composto pelos seguintes componentes, conforme Tabela 1:

Tabela 1: Composição do Cromossomo.

Variável	Descrição
NC	Numero de capacitores
$NF1$	Numero de filtros sintonizados
$NF2$	Numero de filtros de segunda ordem
$Q_{C_{TOT}}$	Potencia reativa total em capacitores
Fd	Arranjo de fatores de distribuição da potencia reativa entre os compensadores
U	Arranjo de localizações dos compensadores no circuito
Q	Arranjo de fatores de qualidade dos filtros
F	Arranjo de frequências de sintonia dos filtros

Fonte: Autores, (2017).

Se o fator de distribuição de potência reativa para o compensador i é Fd_i , a potência reativa do capacitor correspondente a este compensador calcula-se da seguinte maneira: 1) Determina-se a potência reativa não padrão do capacitor Q_{ci} proporcional ao valor do fator de distribuição do ramo:

$$Q_{c_i} = Q_{c_{TOT}} \cdot fd_i / \sum_{j=1}^N fd_j \quad (1)$$

E 2) Determina-se o número de unidades padrão de capacitores que melhor aproximam o valor de potência reativa não padrão Q_{ci} . Este procedimento permite que a distribuição da potência reativa entre os distintos compensadores seja determinada pelo próprio método de otimização a partir das necessidades do problema. Ou seja, esta é uma forma de resolver o problema de distribuir eficientemente a potência dos compensadores entre as localizações determinadas, sem perigo de que se instale uma capacidade total excessiva para o circuito.

II.2 FUNÇÕES OBJETIVO E RESTRIÇÕES

O problema de otimização tratado pode ser formalizado por meio de duas formulações multiobjetivo que em certo modo são equivalentes: uma de três e outra de só duas funções objetivo.

A primeira formulação compreende a minimização dos três objetivos seguintes: 1) O custo do investimento nos compensadores; 2) O custo anual de operação da rede; 3) A distorção total de harmônicos da tensão; Enquanto que a segunda só compreende: 1) A maximização do valor presente líquido do projeto de compensação, e; 2) A minimização da distorção total de harmônicos de tensão.

II.2.1 CUSTO DE INVESTIMENTO DOS COMPENSADORES

Os compensadores de potência reativa, sejam capacitores ou filtros de diferentes tipos, têm um custo de investimento $I(x)$ composto pelos custos do: capacitor, reator, resistor e outros elementos. Os custos do capacitor, reator e resistor são proporcionais as suas respectivas potências para cada nível de tensão [17], enquanto que outros componentes do custo podem supor-se proporcionais à potência reativa do compensador.

Desta maneira, o custo de investimento dos compensadores é [18]:

$$I(x) = K_C \sum_{i \in C_C} Q_{Ci} + K_L \sum_{i \in C_L} Q_{Li} + K_R \sum_{i \in C_R} P_{Ri} \quad (2)$$

Onde K_C (\$/kvar), K_L (\$/kvar) e K_R (\$/kW) são os coeficientes de custo da potência de capacitores Q_C , indutores Q_L e resistores P_R respectivamente e CC , CL e CR representam os conjuntos de cada um destes tipos de elementos.

II.2.2 CUSTO ANUAL DE OPERAÇÃO DA REDE

As redes elétricas de distribuição de meia tensão fornecem cargas residenciais, industriais e de edifícios comerciais que seguem um padrão de comportamento diário bastante estável.

O custo da demanda máxima consiste no custo em que adquire a empresa distribuidora em facilitar a capacidade elétrica necessária de transformadores, linhas, etc. para garantir o fornecimento da potência máxima da carga. Como a compensação da potência reativa modificam as perdas de potência no circuito, este custo é avaliado como proporcional às perdas de potência no horário de máxima demanda ΔP_{max} .

De outra maneira, o custo da energia avalia-se como o custo anual das perdas de energia nos transformadores, linhas e outros elementos do circuito ΔE_a . Como a carga do circuito varia nos distintos L estados de carga característicos do mesmo, é preciso determinar estas perdas de energia como a somatória das perdas de energia de cada estado k de duração anual Δt_k :

$$\Delta E_a = \sum_{k=1}^L \Delta P_k \cdot \Delta t_k \quad (3)$$

Desta maneira, os custos de operação anual da rede se calculam mediante:

$$C(x) = c_D \cdot \Delta P_{max}(x) + c_E \cdot \sum_{k=1}^L \Delta P_k(x) \cdot \Delta t_k \quad (4)$$

Onde c_D (\$/kW) e c_E (\$/kWh) são os coeficientes de custo correspondentes a cada parte da função de custo de operação.

II.2.3 VALOR PRESENTE LÍQUIDO DO PROJETO

Como a instalação de compensadores de potência reativa (capacitores ou filtros de harmônicos) em um circuito é em definitiva um projeto de investimento que se procura obter lucros a partir da economia obtida no custo de operação da rede, pode-se avaliar o valor presente líquido como um indicador econômico que reúne em uma só função os custos de investimento e de operação da rede elétrica.

Considerando um período de avaliação de N anos com uma razão de interesse i , o VPL do projeto de compensação calcula-se como [19]:

$$VPL(x) = -I(x) + \sum_{k=1}^N (C(0) - C(x)) / (1+i)^k \quad (5)$$

Em que, $C(0)$ representa os custos de operação da rede antes de se instalem os compensadores de reativo e a diferença $C(0)-C(x)$ os lucros anuais por conceito de economia.

II.2.4 DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL

O efeito dos bancos de capacitores sobre a distorção da tensão nas barras do sistema depende da magnitude e localização

dos mesmos no circuito, por isso pode existir uma solução por meio de capacitores que não incremente os indicadores de distorção ou que inclusive os reduza.

Por outro lado, os filtros passivos de harmônicos são primariamente dispositivos de controle de harmônicos cuja função é evitar a circulação de correntes distorcidas através dos elementos do sistema e reduzir a distorção harmônica da tensão nas barras. Considerando que todas as normas de controle de harmônicos (IEC 61000-4-7 2010, IEEE 519 2004, Prodíst-Módulo 8 2010) limitam sozinho o valor máximo (de probabilidade 95% ou 99%) da distorção de harmônicos, parece o mais adequado minimizar só o máximo valor do THD do conjunto U das barras do sistema e do conjunto L de todos os estados de carga considerados [20].

$$\max THD(x) = \max_{t=U}^{K=L} \{THD_{k,t}(x)\} \quad (6)$$

As funções objetivo são:

1) Problema com três objetivos a minimizar:

$$\min \{f_1(x) = I(x), f_2(x) = C(x), f_3(x) = \max THD(x)\} \quad (7)$$

2) Problema com dois objetivos a serem minimizados:

$$\min \{f_1(x) = -VPL(x), f_2(x) = \max THD(x)\} \quad (8)$$

Deve observar-se que a minimização do $-VPL(x)$ é igual a maximização do $VPL(x)$.

II.2.5 RESTRIÇÕES

O conjunto de restrições do problema considera dois tipos de restrições fundamentais: 1. As restrições de qualidade da tensão nas barras do sistema; 2. As restrições a saturação dos componentes dos compensadores [21].

A forma de avaliação das restrições de qualidade da tensão depende da norma adotada para avaliar os problemas de qualidade [22].

Para obter que o programa de otimização obtenha soluções factíveis ao problema, define-se uma função de penalidade para as restrições que são avaliadas como a soma quadrática de todas as violações às restrições do problema, quer dizer:

$$g(x) = \sum_{calc_i(x) - limit_i} (calc_i(x) - limit_i)^2 \quad (9)$$

Onde $calc_i$ e $limit_i$ representam o valor calculado e o valor limite do parâmetro i limitado pelas restrições correspondentes.

Uma vez avaliadas todas as restrições do problema, $g(x)$ tem como valor a soma quadrática de todas as violações de acordo com restrições. Se $g(x)$ tem valor zero, a solução x será factível, enquanto que em caso contrário a solução não cumpre uma ou várias restrições. Para incluir as restrições como uma função de penalidade no problema, este deve expressar-se, qualquer que seja o número de funções objetivo que possua, sendo:

$$\min \begin{cases} f_1(x) + \mu \cdot g(x) \\ \vdots \\ f_n(x) + \mu \cdot g(x) \end{cases} \quad (10)$$

Onde μ é uma constante de alto valor que faz atrativa a redução de $g(x)$ e, portanto a obtenção de uma solução factível do problema.

III. ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO

Os métodos clássicos apresentam alguns inconvenientes como o tempo de execução, a não segurança da convergência, a complexidade algorítmica e geração de um número de não dominada de fracas soluções. Devido a estes inconvenientes, os algoritmos evolutivos e graças a sua capacidade para explorar enormes espaços de pesquisa e de fazer requer uma pré-reconhecimento do problema [23].

A diferença dos problemas de otimização monobjetivo, normalmente em um problema de otimização multiobjetivo é que não existe uma solução única que otimize simultaneamente cada objetivo. Um dos métodos de maior êxito na otimização multiobjetivo é o algoritmo elitista de otimização *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm* (NSGA-II), trata o procedimento de classificação das soluções por níveis de dominância [24]. Foi implementado na sua totalidade, numa abordagem designada por NSGA [25][26]. Para a realização deste trabalho, modificou-se o algoritmo publicado para incorporar variáveis inteiras além das variáveis reais que utiliza o início da implementação [27]. Desta maneira, obteve-se um algoritmo de otimização para problemas mistos em inteiros e reais que emprega uma codificação do cromossomo em números reais “*real coded GA*”.

III.1. CÁLCULO DAS FUNÇÕES OBJETIVO E RESTRIÇÕES

O NSGA-II utiliza uma função para avaliar todos os objetivos declarados $f_1(x)$, ... $f_n(x)$ e a função de restrições $g(x)$ a partir do arranjo x de variáveis independentes do problema (cromossomo). Esta função é definida como:

$$function f = evaluate_functions(x,data) \quad (11)$$

Em que, o parâmetro *data* representa os dados adicionais da rede elétrica e as cargas que são necessários para determinar o arranjo f das funções objetivo. O algoritmo que emprega a função *evaluate_functions* é a seguinte: 1) A partir dos dados do cromossomo x , determinasse o correspondente conjunto de compensadores (capacitores ou filtros), seus parâmetros e sua localização no sistema elétrico de distribuição; 2) Calcula-se o custo de investimento dos compensadores determinados; 3) Para todos os L estados de carga considerados, analisa-se a operação do sistema elétrico por meio um programa de fluxo de potência à frequência fundamental e um programa de penetração de harmônicos [28]; 4) Com os resultados calculados para todos os estados de carga característicos, calcula-se o custo de operação da rede, bem como, custo das perdas de energia e custo das perdas no horário pico; 5) Calcula-se os índices de distorção das tensões em todos os estados de carga possíveis e em todas as barras do sistema e determina o máximo valor do THD para avaliar a função objetivo correspondente; 6) Verifica-se as restrições da qualidade de energia em todos os estados de carga e em todas as barras e determina-se a saturação máxima em todos os capacitores. Com estes resultados avalia-se a função de restrições $g(x)$.

III.2 ALGORITMO PRINCIPAL DE OTIMIZAÇÃO

O algoritmo principal de otimização realiza os seguintes passos: 1) Lê os dados do sistema, as cargas e a descrição do

problema de otimização que se quer resolver; 2) Determina o estado de operação inicial do sistema sem os equipamentos compensadores conectados, avalia o custo de operação inicial e determina os índices de distorção harmônica; 3) Define o tamanho da população, executa o algoritmo NSGA-II um número de gerações preestabelecidas para produzir a fronteira do Pareto do problema; 4) Salva a população final do NSGAI em um arquivo *.mat para a posterior análise das soluções obtidas. Este algoritmo principal se programou na função

Matlab *nsga2fdist.m* com a seguinte sintaxe:

$$function f = nsga2fdist(@filename, popsize, generations) \quad (12)$$

Em que, *filename* é o nome do arquivo (*.m) que descreve o problema a ser otimizado, *popsize* é o tamanho da população e *generations* a quantidade de gerações a ser avaliada.

Obtido o arquivo de resultados para o número de gerações especificadas, este é examinado com a função *dispresults.m* que permite visualizar os resultados obtidos e selecionar a variação a empregar segundo o seguinte algoritmo: 1) Mostra-se um gráfico de duas ou três dimensões (segundo o tipo de problema que resolve) com a fronteira do Pareto do problema; 2) Obtém-se um gráfico X,Y das funções objetivo das diferentes variações ordenadas sob o critério desejado; 3) Escolhem-se uma ou várias alterações e imprime-se e 4) Retorna-se ao passo 2 para provar outro ordenamento.

IV. TESTE DE APLICAÇÃO

Como exemplo de aplicação para a presente metodologia foi utilizado o circuito de distribuição Aparecida #3 da cidade de Manaus, como mostra a fig. no apêndice A1. Para provar o comportamento do sistema vão ser considerados três estados de carga possíveis em um ano característico apresentada na tabela 2.

Tabela 2: Estados de carga.

Parâmetro	Estados		
	1	2	3
Duração (horas/ano)	730	5840	2190
Carga (%)	100	60	30

Fonte: Autores, (2017).

Por simplicidade, este comportamento da carga se considera igual para todas as cargas do circuito (lineares e não lineares), não obstante o método pode representar um comportamento diferente para cada carga. Todas as barras de média tensão (1 – 69) com exceção da barra da fonte (0) consideram-se como localização possível para os equipamentos compensadores de potência reativa a serem selecionadas. Para determinar o custo de operação anual do circuito foi empregado os coeficientes de custo utilizados (Custo da demanda $cD = 120\$/kW$ e Custo da energia $cE = 0.015 \$/kWh$) [29].

A avaliação do valor presente líquido foi realizada considerando 10 anos como período de avaliação do projeto e um interesse do dinheiro de 5% anual. Para formar os compensadores de potência reativa foram empregadas unidades trifásicas de capacitores de 150 kvar. Como dados de custo dos capacitores, indutores e resistores foram utilizadas 13 $\$/kvar$, 250 $\$/kvar$ e 100 $\$/kW$ respectivamente [17].

Em todos os casos, utilizaram-se os limites de harmônicos de tensão da norma Prodist-módulo 8 como restrições da qualidade de energia. O problema de otimização apresentado consiste na determinação da potência e localização no circuito de

até três bancos de capacitores e até três filtros sintonizados com quatro possíveis frequências (5o, 7o, 11o ou 13o harmônico) para minimizar: o -VPL do projeto de compensação e o máximo THD da rede em duas condições possíveis: Caso com baixa penetração de harmônicos e o Caso com alta penetração de harmônicos.

IV.1. CASO COM BAIXA PENETRAÇÃO DE HARMÔNICOS

Neste caso se parte do circuito de exemplo, considerando que a carga não-linear é 10% da carga linear em cada barra do sistema. Os resultados iniciais do problema (caso base sem compensadores) apresentados na tabela 3.

Tabela 3: Resultados iniciais.

Parâmetro	Valor
Custo de operação (\$/ano)	26466
Máximo THD (%)	1.79
Máximo IHD (%)	1.52
Fator de potência	0.89

Fonte: Autores, (2017).

Segundo a norma PRODIST-Módulo 8 estes índices de distorção se encontram dentro dos limites normalizados para este nível de tensão. Antes de determinar as soluções de compensação para o problema exposto, vão ser analisadas algumas características do programa de otimização desenvolvido, tais como: convergência das soluções; Influência do número de gerações e a influência do tamanho da população.

Esta análise é importante no caso dos algoritmos genéticos, já que a natureza aleatória da reprodução provoca variações de uma simulação à outra. Na medida em que estas variações sejam menores pode se ter mais confiança nas soluções selecionadas da fronteira de Pareto determinada por uma execução do algoritmo, como mostra a Figura 1.

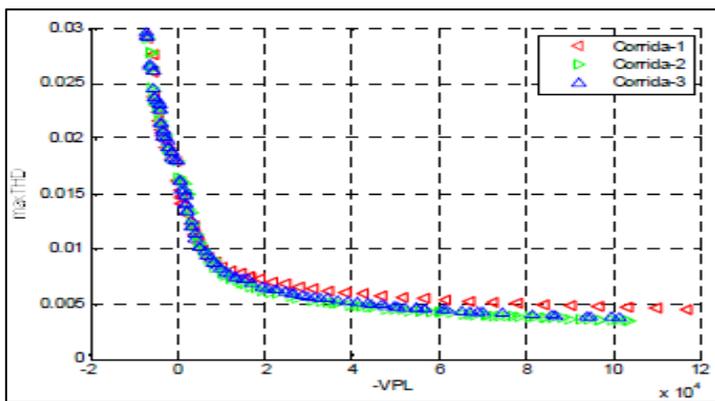


Figura 1: Convergência das soluções (população= 100, gerações=150).

Fonte: Autores, (2017).

Como pode-se observar na figura 2, há uma muito boa correspondência entre os fronts do Pareto obtidos por três corridas independentes do algoritmo com uma população de 100 indivíduos e 150 gerações. Espera-se que a maior número de gerações, os mecanismos evolutivos do NSGA-II possam obter uma melhor fronteira de Pareto, não obstante, isto está em contra do tempo de execução. A figura 2 mostra a evolução da fronteira de Pareto em uma mesma corrida do algoritmo com população de 100 indivíduos a 50, 100 e 150 gerações respectivamente.

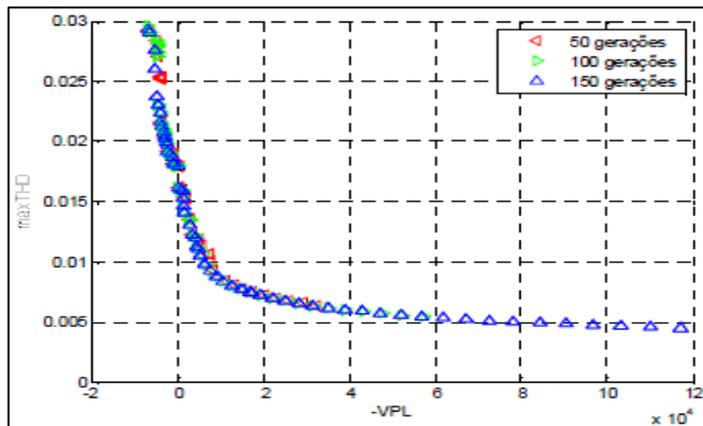


Figura 2: Influência do número de gerações (população=100).

Fonte: Autores, (2017).

O tamanho da população possui uma influência importante na qualidade das respostas obtidas. A utilização de uma população maior permite realizar uma exploração mais ampla das soluções e incrementa a possibilidade de encontrar soluções factíveis do começo da otimização. A Figura 3 mostra as fronteiras de Pareto obtidas com 150 gerações do algoritmo, com populações de 50, 100 e 150 indivíduos respectivamente.

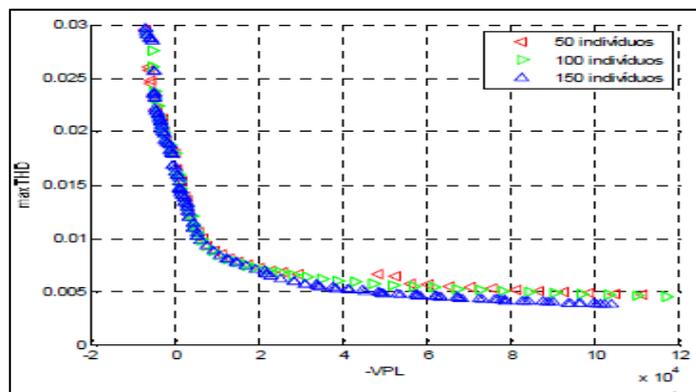


Figura 3: Influência do tamanho da população (gerações = 150).

Fonte: Autores, (2017).

Para ter uma ideia da influência do número de indivíduos da população e o número de gerações sobre o tempo de execução do algoritmo, a Tab. 4 mostra-se o tempo em minutos para as simulações realizadas ao exemplo mostrado. Empregou-se um notebook Toshiba Satellite-Pro (Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU T5870@ 2.00 GHz, 1.87 GB of RAM). Conforme apresenta a Tabela 4, o efeito no tempo de ambos os parâmetros é aproximadamente igual, com um médio de 0.48-0.51 seg./((população*gerações) para este exemplo.

Tabela 4: Tempo de execução (minutos).

População	Gerações		
	50	100	150
50	20.18	40.96	61.48
100	46.05	90.08	137.22
150	66.04	125.32	190.38

Fonte: Autores, (2017).

Obtida a fronteira de Pareto do problema, podem utilizar-se diferentes critérios para escolher a solução a empregar. As soluções do VPL positivo são economicamente factíveis, mas têm o pior comportamento quanto à distorção, não obstante, são

aconselháveis sempre que se cumpram as restrições do problema. Entretanto, as soluções com o VPL negativo só seriam recomendáveis em caso de que fora preciso diminuir a distorção para cumprir as restrições pertinentes. Por exemplo, para fronteira de Pareto da fig. 4, as soluções (1) e (2) têm VPL positivo e, portanto produzem economias pela redução dos custos de operação anuais, enquanto que a solução (3) que é melhor do ponto de vista de qualidade da energia não produz economias e, portanto, somente se aplicaria se quisesse reduzir o *maxTHD* a apenas 1%.

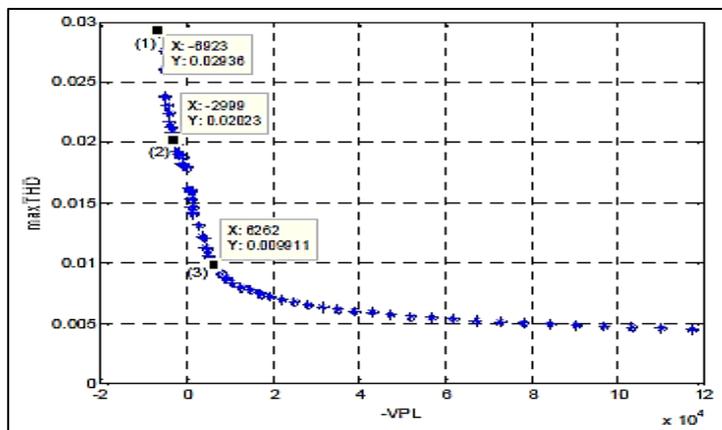


Figura 4: Fronteira de Pareto (população = 100, gerações = 150). Fonte: Autores, (2017).

A Tabela 5 apresenta os dados dos parâmetros selecionados frente às soluções (1), (2) e (3).

Tabela. 5: Parâmetros das soluções selecionadas.

Parâmetro	Solução (1)		Solução (2)		Solução (3)	
Investimento (\$)	17550		6857		25299	
Operação (\$/ano)	23297		25190		24001	
VPL (\$)	6923		2999		-6262	
Máximo THD (%)	2.93		2.02		0.99	
Máximo IHD (%)	2.11		1.72		0.66	
Fator de potência	0.97		0.92		0.95	
Localização e dados dos compensadores	Nós	Dados	Nós	Dados	Nós	Dados
	50	150kvar capacitor	62	300kvar fs=10.4 Q=30.6	57	900kvar fs=4.7 Q=48.8
	56	450kvar capacitor	63	150kvar capacitor		
67	750kvar capacitor					

Onde: fs- frequência de sintonia, Q- fator de qualidade. Fonte: Autores, (2017).

A figura 5 mostra as fronteiras de Pareto da população versus gerações com relação ao VPL versus *maxTHD*. Realizou-se outra prova ao programa para determinar a localização no circuito e os dados de até seis compensadores que minimizam as funções objetivo do problema, mas fixando em cada caso o tipo de compensador desejado: capacitores, filtros sintonizados ou filtros de segunda ordem. Os resultados desta prova são mostrados na figura 5, em que pode-se comprovar que fundamentalmente as soluções com capacitores são as mais econômicas e as de menor efetividade com respeito à distorção, enquanto que as soluções com filtro como é de esperar se

localizam na zona de baixa distorção e pior desempenho econômico.

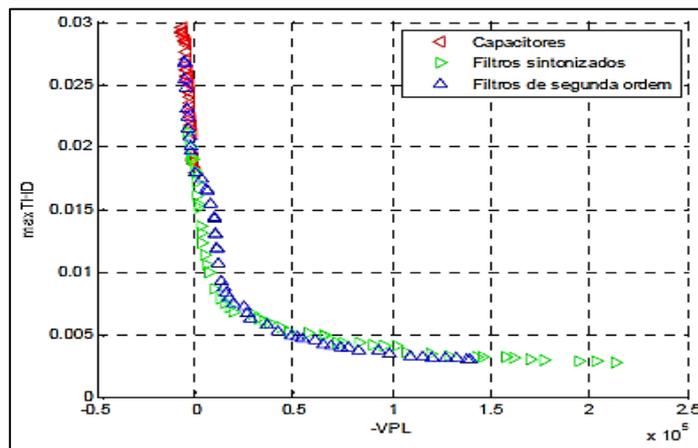


Figura 5: Fronteiras de Pareto (população = 50, gerações = 150). Fonte: Autores, (2017).

É um fato interessante, que podem encontrar-se soluções com filtros (sobre tudo de segunda ordem), que têm melhor VPL que as soluções com capacitores que têm igual THD máximo como mostra a Figura 6.

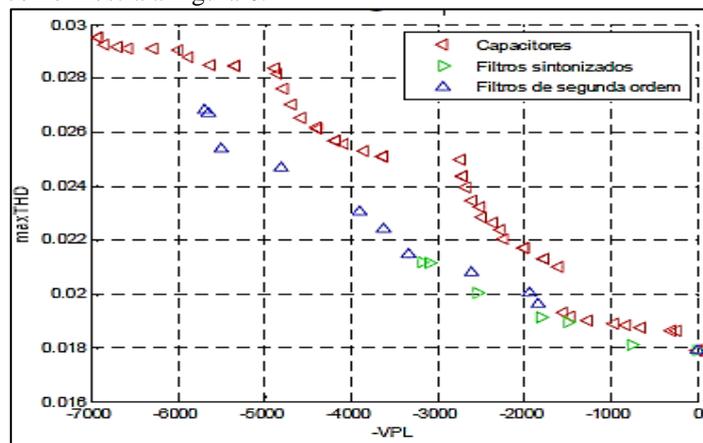


Figura 6. Fronteiras de Pareto (VPL ≥ 0, população=50, gerações=150) Fonte: Autores, (2017).

IV.3 CASO COM ALTA PENETRAÇÃO DE HARMÔNICOS

Neste caso se parte do circuito de exemplo, considerando que a carga não-linear é 40% da carga linear em cada barra do sistema. Os resultados iniciais do problema (caso base sem compensadores) apresentam-se na Tabela 6.

Tabela 6: Resultados iniciais (caso 2).

Parâmetro	Valor
Custo de operação (\$/ano)	27468
Maximo THD (%)	7.24
Maximo IHD (%)	6.16
Fator de potência	0.89

Fonte: Autores, (2017).

Segundo a norma Prodíst-Módulo 8 estes índices de distorção encontram-se fora dos limites normalizados para este nível de tensão. Neste caso, antes que as considerações

econômicas do problema, o primeiro resultado da otimização deve ser a obtenção do grupo de soluções factíveis do ponto de vista da qualidade da energia e de estresse dos capacitores, que minimizem ambas funções objetivo. A figura 7 mostra a fronteira de Pareto deste caso em que se comprova que todas as soluções caem na zona com o VPL negativo, quer dizer, estes são investimentos que não se pagam no tempo estabelecido, mas que são necessárias para cumprir as restrições de qualidade do problema e minimizar a distorção presente na rede.

A localização e outros dados dos compensadores que formam as três soluções selecionadas na Figura 8 e apresentadas na Tabela 7.

Tabela 6: Parâmetros das soluções selecionadas.

Parametro	Solução (1)	Solução (2)	Solução (3)			
Investimento (\$)	67122	102092	133929			
Operação (\$/ano)	25008	22855	23186			
VPL (\$)	-48123	-66473	-100865			
Maximo THD (%)	4.34	3.00	2.27			
Maximo IHD (%)	3.03	1.80	1.33			
Fator de potencia	0.96	0.99	(c)0.93			
Localização e dados dos compensadores	Nós	Dados	Nós	Dados	Nós	Dados
	24	1050 kvar fs = 4.7 Q = 50	21	2850 kvar fs = 4.7 Q = 50	28	4350 kvar fs = 4.7 Q = 46

Onde: fs- frequência de sintonia, Q- fator de qualidade.
Fonte: Autores, (2017).

Realizou-se outra prova ao programa para determinar a localização no circuito e os dados de até oito compensadores que minimizam as funções objetivo do problema, mas fixando em cada caso o tipo de compensador desejado: capacitores, filtros sintonizados ou filtros de segunda ordem. Neste caso não se encontraram soluções factíveis empregando capacitores como mostra a figura 8.

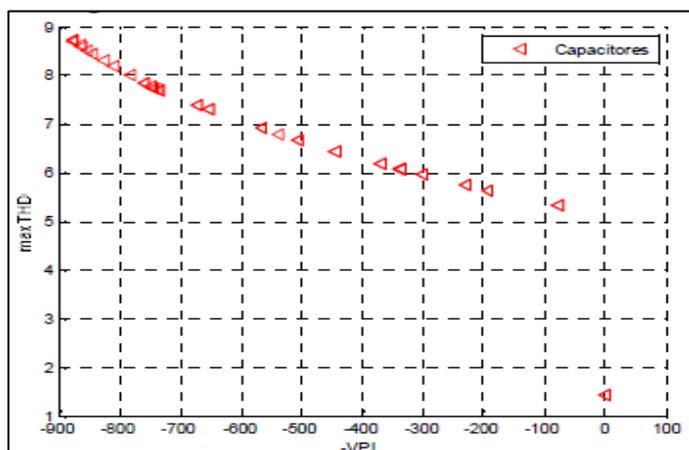


Figura 8. Fronteira do Pareto (população = 50, gerações = 150).
Fonte: Autores, (2017).

Entretanto, quando se empregam sozinho filtros sintonizados ou de segunda ordem, podem obter-se múltiplas soluções factíveis para o problema como mostra a Figura 9,

embora estas soluções não têm neste caso VPL positivo, produto às relações entre os custos de operação, de investimento, etc.

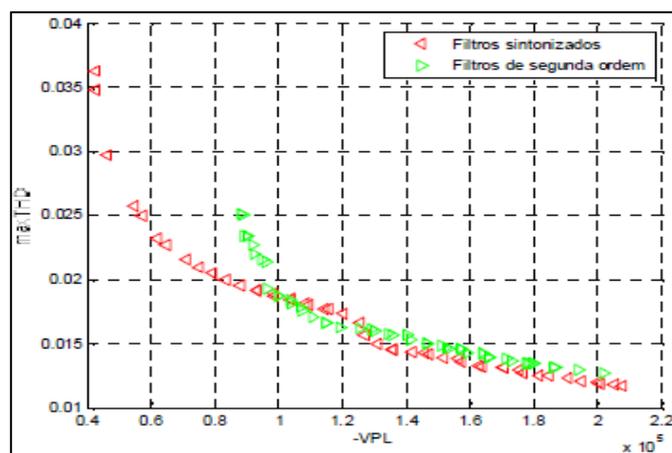


Figura 9. Fronteira do Pareto (população = 50, gerações = 150).
Fonte: Autores, (2017).

V. CONCLUSÕES

O problema de otimização da potência reativa em sistemas elétricos de distribuição foi formulado como um problema multicritério que considera os benefícios econômicos da compensação na operação das redes elétricas e a redução da distorção por harmônicos no sistema. Além disso, a formulação apresentada considera às restrições relevantes impostas pelas normas brasileiras. A ferramenta computacional para resolver esta formulação foi obtidas mediante o algoritmo NSGA-II, que determina as soluções ótimas de Pareto para o problema e permite ao especialista determinar as soluções mais efetivas para o problema.

O programa de computação desenvolvido apresenta várias novidades para este problema como são: 1) É capaz de resolver dois tipos de problemas multiobjetivo: de dois ou três objetivos conforme selecione o especialista; 2) Determina o número e a localização dos diferentes compensadores de potência reativa no circuito sem importar o tipo de configuração do mesmo (pode ser radial ou em malha); 3) Permite determinar a compensação de potência reativa com capacitores em sistemas com certa penetração de harmônicos sem interferir as normas de qualidade da energia pertinentes; 4) Permite empregar filtros passivos de harmônicos de tipo sintonizado ou de segunda ordem para compensar a potência reativa em sistemas com alta penetração de harmônicos, selecionando as frequências e fatores de qualidade de ditos filtros; 5) Tem a norma PRODIST-Módulo 8 incorporada para checar as restrições de qualidade da energia correspondentes; 6) Considera um conjunto de estados de carga para as cargas lineares e não lineares que podem representar o comportamento diário característico das cargas; 7) As cargas não lineares podem representar-se por diferentes padrões de harmônicos de acordo às medições que se realizem nas cargas; 8) As implementações de fluxo de potência a frequência fundamental e de fluxo de potência para harmônicos se desenvolveram utilizando técnicas de modificação da matriz impedância de barras para diminuir o tempo de execução do programa.

Os resultados positivos deste paper, a partir da análise de vários exemplos práticos, mostram as vantagens do método desenvolvido.

VI. ACKNOWLEDGEMENTS

The authors acknowledge the Institute of Technology Galileo of Amazon (ITEGAM) and the Amazonas Research Foundation (FAPEAM) for the financial support as doctorate grant for performing this work.

VII. REFERÊNCIAS

- [1] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance, “**Load representation for dynamic performance analysis**,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 8, no. 2, pp. 472–482, May 1993.
- [2] A. Gebreselassie and J. H. Chow, “**Investigation of the effects of load models and generator voltage regulators on voltage stability**,” Int. J. Electric Power Energy Systems, vol. 16, no. 2, pp. 83–89, 1994.
- [3] D. N. Kosterev, C. W. Taylor, and W. A. Mittelstadt, “**Model validation for the August 10, 1996 WSCC system outage**,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 14, no. 3, pp. 967–979, Aug. 1999.
- [4] W.-S. Kao, “**The effect of load models on unstable low frequency oscillation damping in Taipower system experience w/wo powersystem stabilizers**,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 16, no. 3, pp. 463–472, Aug. 2001.
- [5] Alencar de Souza, B. et al, **Microgenetic Algorithms and Fuzzy Logic Applied to the Optimal Placement of Capacitor Banks in Distribution Networks**, IEEE Transactions on Power Systems, 19(2), 942-947, 2004.
- [6] Mendes, A. et al, **Capacitor placement in large-sized radial distribution networks**, Proc. IEE. Generation, Transmission and Distribution, 152(4), 496–502, 2005.
- [7] Das, D., **Optimal placement of capacitors in radial distribution system using a Fuzzy-GA method**, Electrical Power and Energy Systems 30, 361–367, 2008.
- [8] Chang, Chung-Fu, **Reconfiguration and Capacitor Placement for Loss Reduction of Distribution Systems by Ant Colony Search Algorithm**, IEEE Transactions on Power Systems, 23(4), 2008.
- [9] Tabatabaei S. M. y Vahidi, B., **Bacterial foraging solution based fuzzy logic decision for optimal capacitor allocation in radial distribution system**, Electric Power Systems Research, 81(4), 1045- 1050, 2011.
- [10] Singh, S. P. y Rao, A.R., **Optimal allocation of capacitors in distribution systems using particle swarm optimization**, Electrical Power and Energy Systems, 43, 1267–1275, 2012.
- [11] Da Silva, C. et al, **A Heuristic Constructive Algorithm for Capacitor Placement on Distribution Systems**, IEEE Transactions on Power Systems, 23(4), 2008.
- [12] Segura, S. et al, **Efficient heuristic algorithm used for optimal capacitor placement in distribution systems**, Electrical Power and Energy Systems, 32, 71–78, 2010.
- [13] Abul’Wafa, A. R., **Optimal capacitor allocation in radial distribution systems for loss reduction: A two stage method**, Electric Power Systems Research, 95, 168– 174, 2013.
- [14] Teng Au et al, **Planning Approaches for the Strategic Placement of Passive Harmonic Filters in Radial Distribution Networks**, IEEE Transactions on Power Delivery, 22(1), 347, 2007.
- [15] Chang, G. W., Chu, S. Y. y Wang, H. L., **A New Method of Passive Harmonic Filter Planning for Controlling Voltage Distortion in a Power System**, IEEE Transactions on Power Delivery, 21(1), 305-312, 2006.
- [16] M. Belazzoug. M. Boudour. **FACTS Placement Multiobjective Optimization For Reactive Power System Compensation**. 20 I 0 7th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices. 978-1-4244-7534-6/10/\$26.00 ©2010 IEEE.
- [17] Kawann, C. y Emanuel, A.E., **Passive Shunt Harmonic Filters For Low and Medium Voltage: A Cost Comparison Study**, IEEE Trans. on Power Systems, 11(4), 1825-1831, 1996.
- [18] Azevedo, M.S.S., Abril, I.P., C.A. de L., Leite, J.C., Bezerra, U.H. **Multiobjective optimization of the reactive power compensation in electric distribution systems**. Revista Dyna, Medellin, Colombia, 2014.
- [19] Leite, J.C. Abril, I. Perez, Tostes, M. E. L., Oliveira, R.C. L. **Optimización multiobjetivo de filtros pasivos**. Sixth IEEE/PES Transmission and Distribution Latin America Conference and Exposition (T&D-LA), Montevideo, Uruguay, 3-5 Septiembre 2012.
- [20] Leite, J.C., Abril, I.P, Azevedo, M.S.S., Tostes, M.E.L, Bezerra, U.H. **Evolution of the passive harmonic filters optimization problem in industrial power systems**. Revista Dyna, Medellin, Colombia, 2014.
- [21] Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – Prodist: Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**. 2010.
- [22] IEEE Std. 1531-2003, **IEEE Guide for Application and Specification of Harmonic Filters**, 2003.
- [23] Goldberg, D.E. **Genetic Algorithms in search, optimization and machine learning**. Addison-Wesley, 1989.
- [24] Deb, K, "Evolutionary Algorithms for Multicriterion Optimization in Engineering Design", Evolutionary Algorithms in Engineering and Computer Science, Chapter 8, pp.135-161, 1999.
- [25] Deb, K., **Multi-objective Optimization using Evolutionary Algorithms**, Wiley, Chichester, 2001.
- [26] Seshadri, A., **NSGA-II source code**, Available in <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/10429>

nsgaii-a-multi-objective-optimization-algorithm/ content/NSGA-II/, [citado 23 de Outubro de 2012].

[27] Shengqing L. et al, **Multi-objective Optimal Design for Passive Power Filters in Hybrid Power Filter System Based on Multi-island Particle Swarm Optimization**, 2012 IEEE 7th International Power Electronics and Motion Control Conference - ECCE Asia June 2-5, 2012, Harbin, China.

[28] Leite, J.C. Abril, I. P., Tostes, M. E. L., Oliveira, R. C. L., **“Frequency scan on phase-coordinates frame for unbalanced systems”**. Electric Power Systems Research. Vol. 93, (2012), pp. 113–119.

[29] Grainger, J. And S. H. Lee. **Capacity release by shunt capacitor placement on distribution feeder: A new voltage-dependent model**. IEEE Trans. Power Application Systems., vol. - 101, no. 5, pp. 1236–1244, May 1982.

VIII. APÊNDICE A

DADOS DO CIRCUITO DE TESTE

Como exemplo de prova se utilizou o circuito de distribuição Aparecida #3 da cidade de Manaus que se mostra na figura A.1. Este circuito de 13.8 kV fornece 56 transformadores que totalizam uma potência de 14.37 MVA, em cada um dos quais há uma mescla de carga linear e não-linear. O circuito se alimenta pelo transformador da subestação nos nós 0, onde se considerou uma potência de curto circuito de 250 MVA com relação $X/R = 10$.

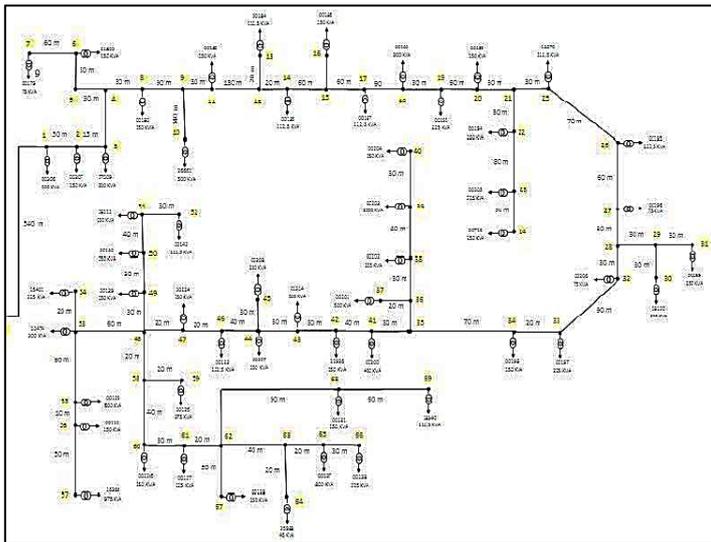


Figura A.1: Diagrama do circuito “Aparecida 3”.

Fonte: Autores, (2017).