

Planejamento Integrado de Bancos de Capacitores e Reguladores de Tensão em Redes de Distribuição

A. M. F. de Almeida, H. D. M. Braz, F. M. P. Pamplona, *Membro, IEEE*,
B. A. de Souza, *Membro Sênior, IEEE*

Abstract – A genetic algorithm for optimal voltage control using automatic capacitors banks and voltage regulators, suitable for large radial distribution networks with any number of laterals is presented. The optimization reference is the medium line of normal voltage interval and the fitness function is the summation of difference square between bus voltage and mean of superior limit and inferior limit. The load flow is calculated by the power summation method, which is fast and of convergence guaranteed. Beside the installation points, the regulator taps to be operated in peak and low loads are determined. The reduction of losses obtained by action of the regulators is got in addition. The algorithm has been applied to several feeders. The results of one among those applications are presented in this paper. The results obtained in all of the cases are very good. The proposed method is sufficiently efficient to be employed in studies of coordination of automatic regulators and automatic capacitors bank in distribution networks, same large and very loaded.

Index Terms – Genetic algorithms, Radial primary distribution network, Voltage control, Voltage regulator, Loss reduction.

I. INTRODUÇÃO

Instalar bancos de capacitores e reguladores de tensão em redes de distribuição com o propósito de reduzir as perdas e melhorar o perfil de tensão é uma prática comum. Assim se tem resolvido problemas dessa natureza quando não são tão graves a ponto de exigir soluções mais drásticas, tais como: recondutoramento ou reconfiguração de rede, implantação de novos alimentadores, construção ou ampliação de subestações.

Dentre os trabalhos dedicados ao controle integrado de tensão e reativo (volt/var), [1] e [2] se destacam. Contudo, esses trabalhos não consideram a característica discreta do problema. Em [3] e [4], também são consideradas a interdependência entre o perfil de tensão e as perdas na rede de distribuição. Em [5] foi sugerido um método heurístico para a seleção e alocação de bancos de capacitores e reguladores de tensão em redes de distribuição, que considera o modelo de corrente constante para as cargas.

A. M. F. de Almeida, H. D. M. Braz e B. A. Souza participam do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Av. Aprígio Veloso, 882, Campina Grande – PB, 58.109-970, Brasil. F. M. P. Pamplona é professor do Centro Federal de Educação Tecnológica de Alagoas – CEFET-AL, Av. Barão de Atalaia, S/N – Poço, Maceió – AL, 57051-810, Brasil.
e-mails: {angelo, helon, franklin, benemar}@ee.ufcg.edu.br.

O conceito de curvas típicas de carga para a representação da carga no alimentador é utilizado em [6]. Primeiro é feita a alocação de capacitores e em seguida a alocação de reguladores, mas esta última partindo da condição inicial do sistema, sem equipamentos instalados. Para ambos foi considerado o custo-benefício da alocação dos equipamentos utilizados.

Um algoritmo para localização ótima de reguladores de tensão em alimentadores radiais que leva em conta os custos de redução de perdas com a instalação dos reguladores é apresentado em [7], mas não considera a característica discreta do problema.

O trabalho aqui apresentado segue a linha adotada em [8], em que dois algoritmos genéticos (Sistema Duplex) foram utilizados com êxito para o planejamento ótimo de filtros harmônicos passivos e a localização e ajustes ótimos de um regulador de tensão em redes de distribuição. Agora a técnica é utilizada para o planejamento ótimo de bancos de capacitores e reguladores de tensão, simultaneamente. Os AG de capacitores e de reguladores utilizam a formulações conforme apresentadas em [9] e [10].

II. MODELOS ADOTADOS

Para as cargas do alimentador radial foi considerado o modelo de potência constante. Entretanto, outros modelos de carga podem ser incorporados ao presente método com facilidade. Também são adotados três patamares da curva de carga diária do alimentador primário.

O modelo do alimentador radial adotado considera somente a impedância série do trecho, visto ser desprezível a capacitância shunt para alimentadores de distribuição. Para o capacitor, foi adotado o modelo de impedância constante. O modelo para os reguladores de tensão, conforme apresentado em [9] é o banco de unidades monofásicas, ligados em delta fechado e com faixa de regulação total de 15%.

III. ALGORITMOS GENÉTICOS

Os algoritmos genéticos (AG) [11] são inspirados na evolução das espécies segundo a teoria de Darwin. Embora haja um grande número de variantes do AG clássico, todos realizam uma série de buscas com o objetivo de encontrar o cromossomo mais forte e mais adaptado ao ambiente em que se encontra. Esse melhor cromossomo, como todos os outros,

é gerado mediante cruzamentos e mutações.

Os algoritmos genéticos 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. 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, que inclui cruzamentos e mutações.

Cada vez que esse ciclo se completa é dito que ocorreu uma geração. A seleção dos cromossomos para reprodução e a mutação são efetuadas 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.

IV. ALGORITMO GENÉTICO COMBINADO

O problema do planejamento integrado de bancos de capacitores e reguladores de tensão exige que sejam atendidos vários critérios simultaneamente. Em termos gerais, deseja-se garantir um perfil de tensão o mais próximo possível da tensão nominal do sistema e um percentual mínimo de perdas com um investimento mínimo. Com base na teoria e na experiência, se sabe que o capacitor faz, com excelência, a compensação reativa e, como consequência, permite reduzir perdas e melhorar o perfil de tensão. O regulador de tensão por sua vez, tem como principal efeito a correção do perfil de tensão e com isso se consegue uma parte da redução das perdas. Como se percebe, o problema tem uma característica multiobjetivo.

A utilização de um algoritmo genético básico para este tipo de problema é de difícil implementação, pois a função de aptidão teria que ser formulada levando-se em conta todos os objetivos, ponderando cada um na proporção adequada e usando penalidades. Em vez disso, optou-se por utilizar dois AG encadeados, um para a alocação de bancos de capacitores e outro para reguladores de tensão, denominado neste trabalho de Sistema Duplex (*volt/var*).

A. O Sistema Duplex (*volt/var*)

Os dois AG são independentes do ponto de vista de implementação, pois cada um tem sua função de aptidão e parâmetros de controle, como: tipo de codificação, tamanho da população, taxas de cruzamento e de mutação. Todavia, os AG são fortemente influenciados um pelo outro, pois a partir da convergência de um, tem-se as condições iniciais para iniciar o outro. O processo de busca é iterativo e cada execução dos dois AG define uma época. Neste contexto, o termo época tem o significado como descrito para algoritmos micro-genéticos.

Cada algoritmo trabalha separadamente e da seguinte maneira: inicia-se o processo com o AG de capacitores e quando este converge, passa-se para o AG de regulador de

tensão, de modo que este já considere a solução obtida pelo primeiro AG. Ao término deste é completada uma época.

O processo continua com o AG de capacitores que já considera a solução encontrada pelo AG do regulador na época anterior. O processo segue então em várias épocas até que a solução de cada AG se repita por um número fixo de épocas. Neste trabalho, foi considerado como critério para a convergência do processo um número pré-determinado de épocas. A Figura 1 resume o funcionamento do Sistema Duplex (*volt/var*).

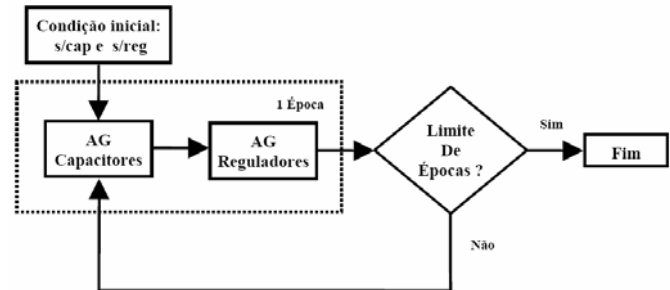


Fig. 1. Esquema do Sistema Duplex *volt/var*.

B. O AG de Capacitores

O algoritmo genético de capacitores é implementado conforme [10], incluindo a modificação de considerar o capacitor como uma carga de impedância constante. A Figura 2 ilustra a codificação do cromossomo adotada para um total de alocação em quatro barras. A codificação adotada é no sistema binário, mas por conveniência, são mostrados os números após a decodificação já no sistema decimal.

O cromossomo é composto por quatro partes: a primeira informa as barras onde serão instalados os capacitores. A segunda e terceira partes informam os números de módulos capacitivos chaveados para as condições de carga de pico e carga intermediária, respectivamente. A última parte informa o número de módulos capacitivos fixos. A potência em kvar dos bancos fixos e chaveados é escolhida de acordo com as unidades padronizadas no mercado.

C. O AG de Reguladores

O algoritmo genético do regulador de tensão é baseado na implementação feita [9], sendo que agora são considerados três patamares da curva de carga, em vez de dois. Outra mudança foi na função de aptidão, que agora foi elaborada em termos de custos. Ela ainda reflete o critério técnico anteriormente estabelecido, ou seja, procurar manter as tensões de barra o mais próximo possível da tensão nominal do alimentador.

A redução do espaço de busca adotada para o AG considera apenas as barras do tronco do alimentador cujas tensões estejam acima da mínima permitida e cujos fluxos não ultrapassem o limite de potência nominal (S_{reg}) dos reguladores comercialmente disponíveis, ou um limite

Barras	N° de Módulos Capacitivos p/ a carga de:														
	pico				intermediária				leve						
7	15	21	33	0	1	0	1	2	0	1	0	2	1	2	3

Fig. 2. Cromossomo para o AG de capacitores.

especificado previamente pelo usuário. Os fluxos de carga calculados [12], para cada patamar da curva de carga continuam considerando o alimentador completo.

A Figura 3 mostra o cromossomo adotado para a alocação de um banco de reguladores e os ajustes dos *taps* de acordo com o patamar da curva de carga. A codificação é feita no sistema binário. O cromossomo é composto por quatro partes: A primeira parte informa a barra onde será localizado o banco. As outras três informam os *taps* em que deve operar para as condições de carga de pico, intermediária e leve, respectivamente.

O número de bits necessários para codificar a barra onde se instalará o banco e os degraus em que deve operar, são determinados conforme a técnica apresentada [8].

V. QUANTIFICANDO OBJETIVOS

Como descrito na seção anterior, o problema de planejamento integrado de bancos de capacitores e de reguladores de tensão em redes de distribuição é formulado neste trabalho como um problema de otimização combinatória para ser resolvido utilizando dois AG encadeados. Resolver o problema significa determinar as barras onde serão instalados os bancos de capacitores fixos e chaveados, e suas programações, bem como determinar a barra onde será instalado o banco de reguladores de tensão e sua programação diária. Para a especificação completa dos AG resta formular as respectivas funções de aptidão.

No Sistema Duplex (*volt/var*) proposto, as funções de aptidão são formuladas de maneira independente tanto para o AG de capacitores, quanto para o AG de reguladores, cada uma buscando atender o que o referido equipamento faz com excelência.

Para a função de aptidão do AG de capacitores, o objetivo definido é maximizar a economia líquida proveniente da redução das perdas após a inserção dos capacitores, enquanto que para a função de aptidão do AG de reguladores, é minimizar os custos decorrentes da operação para corrigir o perfil de tensão do alimentador.

A. Função de aptidão de capacitores

A função de aptidão para o AG de capacitores é formulada de modo a ser maximizada, porém em lugar de se trabalhar apenas com a redução das perdas de potência, considera-se a economia total líquida (em R\$ ou US\$, por exemplo) obtida com a instalação de capacitores fixos e chaveados. De acordo com o exposto em [10], a função de aptidão implementada é:

$$f = K_p \Delta^2 p + K_E \Delta^2 E - K_C (n_f, n_c, c_{inst}) \quad (1)$$

Nesta função, K_p é o custo médio anual de perda de potência de pico (\$/kW/ano). O valor de K_p está relacionado com os custos que a concessionária teria para atender novos

consumidores em horário de pico, investimentos na melhoria do sistema, amortização desses investimentos, etc. Varia bastante de uma concessionária para outra. A variável K_E é o custo médio anual de perda de energia, contabilizadas em período integral, sendo que a faixa de valores deste custo encontrados na literatura está entre 0,03 e 0,07 (\$/kWh).

A redução de perdas de potência de pico é dada por $\Delta^2 p$ ($\Delta(\Delta p)$) e a redução das perdas de energia é dada por $\Delta^2 E$ ($\Delta(\Delta E)$). Os custos de aquisição e instalação dos capacitores são dados pela função K_C .

A função K_C depende do número de capacitores fixos (n_f) e chaveados (n_c) a serem adquiridos e do custo de instalação associado (c_{inst}). Em geral, o custo dos capacitores é dado por unidade de potência reativa (\$/kvar), sendo que os capacitores chaveados apresentam maior custo de aquisição do que os fixos.

O custo de instalação dos capacitores é um fator bastante subjetivo e pode variar de concessionária para concessionária. No algoritmo implementado, pode ser associado um custo diferente para cada ponto físico disponível para instalação de capacitores. Fica a critério do usuário indicar o custo de instalação mais adequado, o qual inclusive pode ser nulo.

B. Função de aptidão de reguladores

A formulação para a função de aptidão de reguladores é baseada em custos, mas também toma como critério manter as tensões nas barras o mais próximo possível de uma tensão de referência, normalmente tomada como a tensão nominal.

A idéia é de se considerar o custo do controle da tensão na barra, implementado da seguinte forma: para valores de tensão próximos do valor de referência desejado, o custo seria mínimo. Mas à medida que o valor de tensão numa barra se afasta da referência, o custo do controle da tensão nesta barra para um valor próximo da referência, também aumenta.

Para isso, foi interpolado um polinômio de terceiro grau no qual foi tomado como referência o custo dos reguladores de tensão. Os pontos fornecidos para a interpolação do polinômio foram baseados nas seguintes premissas:

- Para a tensão de referência, o custo do controle da tensão é zero;
- Um custo de 1% do valor do regulador é atribuído para o controle da tensão numa barra, cuja tensão esteja 0,02 pu fora da tensão de referência (Ex: $p/v = 0,98$ pu ou $v = 1,02$ pu);
- Um custo de 5% do valor do regulador é atribuído para o controle da tensão numa barra, cuja tensão esteja 0,05 pu fora da tensão de referência (Ex: $p/v = 0,95$ pu ou $v = 1,05$ pu);
- Um custo de 100% do valor do regulador é atribuído para o controle da tensão numa barra, cuja tensão esteja 0,12 pu fora da tensão de referência (Ex: $p/v = 0,88$ pu ou $v = 1,12$ pu).

A Figura 4 mostra o comportamento da função interpolada de acordo com a premissa estabelecida de manter a tensão de barra próxima da tensão de referência. Para tensões acima da tensão de referência, também existe a preocupação de efetuar

Barra	Ajuste do tap para a carga de:																		
	pico				intermediária				leve										
1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1

Fig. 3. Cromossomo para o AG de reguladores.

o controle da tensão, pois se deve estabelecer um limite superior de tensão, que atenda aos critérios de qualidade que limitam o nível máximo de tensão entregue ao consumidor.

Através do rebatimento da Figura 4, em relação ao eixo vertical, a função utilizada é a mesma, pois o que se pretende é não deixar que as tensões de barra se afastem da tensão de referência. No caso geral a formulação é a seguinte:

$$fp(\Delta) = a\Delta^3 + b\Delta^2 + c\Delta + d \quad (2)$$

em que:

- fp representa o percentual do custo do controle da tensão na barra;
 a, b, c e d são os coeficientes do polinômio de terceiro grau;
 Δ é a diferença entre a tensão de referência e a tensão da barra em pu.

Os valores de Δ devem ser sempre positivos, mesmo quando os valores da tensão de barra forem maiores que a tensão de referência. Desta forma, garante-se a simetria. A formulação é mostrada a seguir:

$$f(c) = C_{reg} + \sum_{n=1}^{npat} \left(\sum_{i \in \Omega_{lw}} fp(\Delta_i) + \sum_{k \in \Omega_{up}} fp(\Delta_k) \right) \quad (3)$$

em que:

- c é uma possível solução, codificada por um cromossomo, conforme visto na seção 4.3;
 C_{reg} é o custo do regulador de tensão;
 $npat$ é o número de patamares utilizados para a curva de duração de carga segmentada;
 Ω_{lw} é o conjunto de barras com tensão abaixo da tensão de referência;
 Δ_i é a diferença entre a tensão de referência e a tensão na barra i .
 Ω_{up} é o conjunto de barras com tensão acima da tensão de referência;
 Δ_k é a diferença entre a tensão na barra k e a tensão de referência.

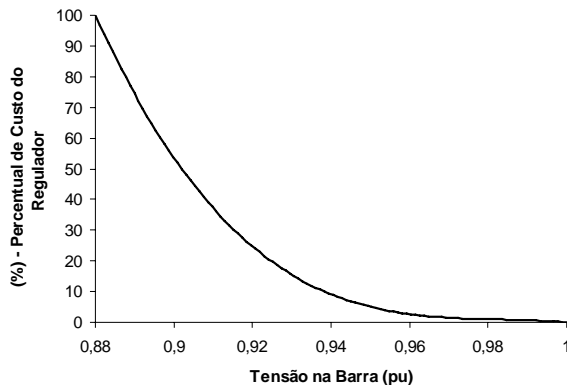


Fig. 4. Gráfico do polinômio de 3º interpolado para compor a função de aptidão do regulador de tensão em termos de custos.

A função custo, a ser minimizada, tem como resultado o custo de operação para corrigir a tensão na barra. Não necessariamente para aumentar a tensão, mas para mantê-la dentro da faixa admitida. A função de aptidão foi implementada para computar custos iguais, de forma simétrica, para tensões acima ou abaixo da referência. Por exemplo, uma barra com tensão de 1,05 pu terá o mesmo custo para a correção da tensão que uma barra cuja tensão seja 0,95 pu.

VI. APLICAÇÃO

O algoritmo proposto foi implementado em Matlab® 6.5 num microcomputador Athlon® XP 2000. O alimentador utilizado foi o CZA03 de 62 barras da CEAL, cujos dados de linha e de carga encontram-se na Tabela I. Este alimentador teve medições realizadas durante um período de 24 horas, efetuadas no dia 01/06/2006 e, de posse dessas medições, foi feita a segmentação da curva de carga em três patamares. Utilizou-se a rotina desenvolvida por [10], em que é utilizado um algoritmo genético para realizar a segmentação ótima da curva de duração de carga em um número de patamares desejado. Os fatores de carga obtidos estão na Tabela II.

Um fator de potência único de 0,85 para todas as cargas do alimentador foi considerado.

A avaliação do impacto que o planejamento integrado de bancos de capacitores e reguladores de tensão teve sobre o alimentador CZA03 foi feita para quatro casos distintos, em que são verificados: o perfil de tensão do tronco e as perdas do alimentador, contabilizados para um período de um ano. Os casos analisados são:

1. Sem Capacitores e sem regulador;
2. Com capacitores e sem regulador;
3. Sem capacitores e com regulador;
4. Com Capacitores e com regulador (Duplex *volt/var*).

Os parâmetros do AG de reguladores foram: população de 80 cromossomos e taxas de cruzamento e mutação de 60% e 2,5%, respectivamente. O critério de convergência foi o limite de 200 gerações. Os mesmos parâmetros foram adotados para o AG de capacitores, com exceção do critério de convergência, que foi de 300 gerações. Em ambos, foi utilizado elitismo.

Uma potência limite de 414 kVA foi adotada para o AG de reguladores, sendo o resultado da localização e ajustes ótimos, apresentado na Tabela III.

Para os capacitores foi estabelecido um máximo de 30 módulos. Cada módulo com 200 kvar ao custo de \$200,00 para o fixo e de \$240,00 para o chaveado. A constante K_E foi considerada igual a \$0,04/kWh e K_p igual a \$180,00/kW/ano. A alocação dos bancos é apresentada na Tabela IV.

TABELA I
DADOS DO ALIMENTADOR CZA03 DA CEAL

de	para	C(km)	R/km	X/km	S(kVA)	cabo
0	1	0,61	0,2006	0,4026	150	336,4_CA
1	2	0,77	0,1202	0,3592	337,5	477_CAA
2	3	0,2	1,3735	0,486	0	6_CU
2	4	0,36	1,3735	0,486	412,5	6_CU
4	5	0,24	1,3735	0,486	0	6_CU
4	6	0,47	1,3735	0,486	45	6_CU
2	7	0,48	0,1202	0,3592	420	477_CAA
7	8	0,37	1,3735	0,486	45	6_CU
8	9	0,02	1,3735	0,486	300	6_CU
9	10	0,42	1,3735	0,486	262,5	6_CU
10	11	0,22	1,3735	0,486	450	6_CU
7	12	0,34	1,3735	0,486	375	6_CU
7	13	0,33	0,1202	0,3592	150	477_CAA
13	14	0,17	0,2006	0,4026	45	336,4_CA
14	15	0,22	0,2006	0,4026	45	336,4_CA
15	16	0,64	0,2006	0,4026	45	336,4_CA
16	17	0,04	0,2006	0,4026	75	336,4_CA
13	18	0,16	0,1202	0,3592	0	477_CAA
18	19	0,1	1,3735	0,486	75	6_CU
19	20	0,05	1,3735	0,486	150	6_CU
19	21	0,08	1,3735	0,486	45	6_CU
18	22	0,28	0,1202	0,3592	187,5	477_CAA
22	23	0,2	1,3735	0,486	225	6_CU
22	24	0,14	0,1202	0,3592	45	477_CAA
24	25	0,2	0,1202	0,3592	75	477_CAA
25	26	0,08	1,3735	0,486	45	6_CU
25	27	0,27	1,3735	0,486	112,5	6_CU
25	28	0,27	0,1202	0,3592	262,5	477_CAA
28	29	0,16	1,3735	0,486	75	6_CU
29	30	0,16	1,3735	0,486	150	6_CU
28	31	0,16	0,1202	0,3592	45	477_CAA
31	32	0,18	1,3735	0,486	0	6_CU
32	33	0,52	1,3735	0,486	232,5	6_CU
32	34	0,18	1,3735	0,486	75	6_CU
34	35	0,28	1,3735	0,486	225	6_CU
35	36	0,31	1,3735	0,486	150	6_CU
31	37	0,36	0,1202	0,3592	225	477_CAA
37	38	0,1	1,3735	0,486	195	6_CU
37	39	0,23	0,1202	0,3592	30	477_CAA
39	40	0,23	0,1202	0,3592	157,5	477_CAA
40	41	0,24	0,2006	0,4026	112,5	336,4_CA
41	42	0,12	0,2006	0,4026	150	336,4_CA
42	43	0,22	0,2006	0,4026	75	336,4_CA
43	44	0,28	0,2006	0,4026	112,5	336,4_CA
44	45	0,2	1,3735	0,486	45	6_CU
44	46	0,28	0,2006	0,4026	150	336,4_CA
46	47	0,37	1,3735	0,486	270	6_CU
47	48	0,19	1,3735	0,486	375	6_CU
46	49	0,4	0,2006	0,4026	75	336,4_CA
49	50	0,33	0,2006	0,4026	75	336,4_CA
50	51	0,23	0,2006	0,4026	75	336,4_CA
51	52	0,27	0,2006	0,4026	262,5	336,4_CA
52	53	0,28	0,2006	0,4026	187,5	336,4_CA
53	54	0,19	0,2006	0,4026	675	336,4_CA
52	55	0,3	0,2006	0,4026	337,5	336,4_CA
55	56	0,08	0,2734	0,4264	225	2/0_CU
56	57	0,16	0,2734	0,4264	375	2/0_CU
57	58	0,08	0,2734	0,4264	225	2/0_CU
58	59	0,04	0,2734	0,4264	112,5	2/0_CU
57	60	0,17	0,2734	0,4264	600	2/0_CU
60	61	0,07	0,2734	0,4264	300	2/0_CU
60	62	0,28	0,2734	0,4264	337,5	2/0_CU

TABELA II
FATORES DE CARGA OBTIDOS DA SEGMENTAÇÃO

Patamar	1 - pico	2 - intermediário	3 - leve
Fator de Carga	0,67	0,52	0,43
Duração (h)	5,83	10	8,17

A implementação do algoritmo proposto mostrou que a ação conjunta de bancos capacitores e reguladores de tensão têm o caráter multiobjetivo. Isto implica para este problema: reduzir perdas e ao mesmo tempo, promover a correção do perfil de tensão, sendo cada objetivo atendido de forma satisfatória.

O sistema Duplex (*volt/var*) foi implementado segundo a definição da seção V. Cada AG operando de forma independente, mas sendo influenciado pelos resultados um do

outro. Foi estabelecido o critério de convergência como sendo o limite de 20 épocas. O tempo total de execução foi de 114 minutos.

A Figura 5 mostra o perfil de tensão, no tronco do alimentador, para cada caso estudado, em que se percebe ser o perfil de tensão para o Sistema Duplex (*volt/var*) o que atendeu melhor ao critério de manter as tensões de barra o mais próximo possível da tensão de referência.

A Figura 6 comprova o fato de que a redução de perdas quando se usa somente o banco de reguladores de tensão é muito pequena quando comparada com a redução que se consegue quando se utiliza bancos de capacitores.

TABELA III
RESULTADO DO AG DE REGULADORES IMPLEMENTADO NO SISTEMA DUPLEX (*VOLT/VAR*)

Barra	Tap p/ a condição de carga de		
	pico	intermediária	leve
18	3	2	2

TABELA IV
RESULTADO DO AG DE CAPACITORES IMPLEMENTADO NO SISTEMA DUPLEX (*VOLT/VAR*)

Tipo: Barra	Fixo leve	Chaveado	
		Intermediário	Pico
52	3	1	1
37	3	0	0
60	3	1	0
46	2	0	1
22	3	2	0
11	2	0	0
Subtotal	16	6	
Total	22		

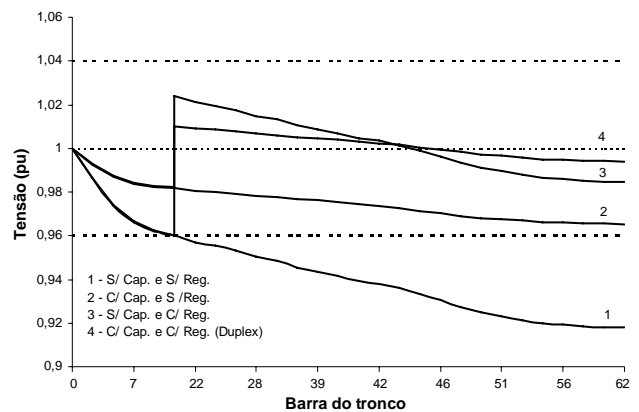


Fig. 5. Perfis de tensão do tronco do alimentador CZA03 – CEAL, em todos os casos estudados.

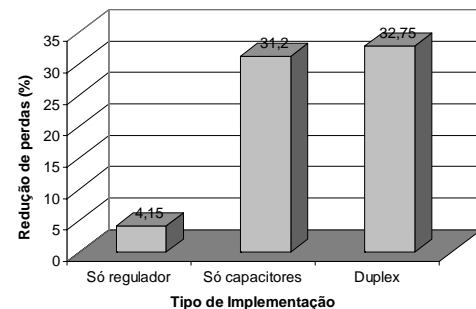


Fig. 6. Comparação do percentual de redução das perdas anuais de energia.

VII. CONCLUSÕES

A combinação de dois algoritmos genéticos básicos foi elaborada para resolver o problema multiobjetivo do planejamento integrado de bancos de capacitores e reguladores de tensão. Com base na análise dos resultados obtidos, o atendimento aos objetivos de redução de perdas e correção do perfil de tensão somente foi atendido plenamente quando se utilizou o Sistema Duplex (*volt/var*) proposto. Embora esse resultado não seja conclusivo sobre a aplicabilidade dessa estratégia à solução de outros problemas de sistemas de potência, é possível concluir que para o problema apresentado, o sistema Duplex é adequado. Trata-se de uma solução de fácil implementação e capaz de obter bons resultados com um tempo de execução aceitável, visto que se trata de problema de planejamento.

VIII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Grainger, J. J., Civanlar, S. (1985). Volt/Var Control on Distribution with Lateral Branches Using Shunt Capacitors and Voltage Regulators. Part I: The Overall Problem. IEEE on Power Apparatus and Systems, 104(11):3278-3283.
- [2] Civanlar, S., Grainger, J. J. (1985). Volt/Var Control on Distribution with Lateral Branches Using Shunt Capacitors and Voltage Regulators. Part III: The Numerical Results. IEEE on Power Apparatus and Systems, 104(11):3291-3297.
- [3] Salama M.M.A., Chikhani, A.Y. (1992). "An Expert System for Reactive Power Control of a Distribution System. Part I: System Configuration". IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 7, pp. 940-945.
- [4] Laframboise, J.R.P.R, Salama M.M.A., Ferland, G., Chikhani, A.Y. (1995). "An Expert System for Reactive Power Control of a Distribution System. Part II: System Implementation". IEEE Transactions on Power Systems, vol. 10, pp. 1433-1441.
- [5] Oliveira, C.C.B., Kagan, N. (1998). Modelagem Heurística para a Seleção e Locação de Bancos de Capacitores e de Reguladores de Tensão em Redes de Distribuição. III Congresso Latino Americano de Distribuição. P. 602-606.
- [6] Kagan, N. Oliveira, C.C.B, Méffe, A. (2004). "Alocação de Bancos de Capacitores e Reguladores de Tensão em Redes de Distribuição". IEEE/PES T&D Latin America.
- [7] Safigianni, A.S, Salis, G.J. (2000) "Optimum Voltage Regulator Placement in Radial Power Distribution Network". IEEE Transaction on Power Systems, vol. 15, n° 2, pp. 879-886.
- [8] Almeida, A.M.F., Pamplona, F.M.P., Braz, H.D.M., Souza, B.A. (2005) "Controle Integrado do Perfil de Tensão e de Distorções Harmônicas em Alimentadores Radiais de Distribuição com Aplicação Simultânea de Reguladores de Tensão e Filtros Harmônicos Passivos". VI SBQEE – Seminário Brasileiro sobre Qualidade de Energia.
- [9] Almeida, A.M.F., Souza, B.A., Pamplona, F.M.P., Braz, H.D.M. (2005) "Optimal Localization of Voltage Regulator Banks In Distribution Systems Based On Technical And Economic Criteria". CIRED - 18th International Conference on Electricity Distribution, Turin.
- [10] Ferreira, H.A., Souza, B.A., Alves, H.N. (2002) "Optimal Capacitor Allocation in Electrical Distribution Systems Using Genetic Algorithm". IEEE/PES T&D Latin America.

- [11] D. E. Goldberg, "Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning," Addison-Wesley, 1989, pp. 412.
- [12] Das, D., Kothari, D. P., Kalam, A. "Simple and Efficient Method for Load Flow Solution of Radial Distribution Networks," Electrical Power & Energy Systems, vol. 17, pp. 335-346, May 1995.

IX. BIOGRAFIAS



Ângelo Márcio Formiga de Almeida nasceu em Pombal, Brasil, 1972. Recebeu o título de B.Sc em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) e M.Sc. em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, Brasil em 2004. Atualmente é aluno de doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFCG. Suas áreas de interesse são métodos de otimização aplicados a sistemas de potência, operação e planejamento de sistemas elétricos.



Franklin M. P. Pamplona nasceu em Brasília, Brasil, 1970. Recebeu os títulos de B.Sc. e M.Sc. em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB), e D.Sc. em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Atualmente é professor do CEFET-AL, Brasil. Suas áreas de interesse são Qualidade de Energia e Análise e Planejamento de Sistemas de Distribuição.



Helon David Macedo Braz nasceu em João Pessoa, Brasil, 1978. Ele recebeu os títulos de B.Sc. e M.Sc. em Engenharia Elétrica, em 2001 e 2003, pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Campina Grande, Brasil. Atualmente, cursa doutorado na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, Brasil. Suas áreas de interesse para pesquisa incluem a aplicação de sistemas inteligentes, como sistemas especialistas, redes neurais, e técnicas de programação evolucionária, em sistemas de potência.



Benemar Alencar de Souza (M'02) nasceu no Crato, Brasil, 1954. Ele recebeu os títulos de B.Sc., M.Sc. e Ph.D. em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Campina Grande, Brasil, em 1977, 1981 e 1995, respectivamente. Atualmente, ele é professor do Departamento de Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, Brasil. Suas atividades de pesquisa são centradas em métodos de otimização e técnicas de inteligência artificial aplicadas a sistemas de potência, transitórios eletromagnéticos, e planejamento e operação de sistemas de potência.