

Metaheurística para balanceamento de bancos de capacitores de alta tensão

André de Freitas Queles
Gerência de Operação Minas – GRM.O
Eletrobrás Furnas
Belo Horizonte, Brasil
aqueles@furnas.com.br

Leônidas Chaves de Resende
Programa Pós Graduação Engenharia Elétrica – PPGE
Universidade Federal de São João del Rei - UFSJ
São João del Rei, Brasil
leonidas@ufs.edu.br

Luiz Antônio da Fonseca Manso
Programa Pós Graduação Engenharia Elétrica – PPGE

Universidade Federal de São João del Rei - UFSJ
São João del Rei, Brasil
lmanso@ufs.edu.br

Augusto Xavier Oliveira de Siqueira
Departamento de Engenharia Elétrica – DEPEL
Universidade Federal de São João del Rei – UFSJ
São João del Rei, Brasil

Henrique Witney Martins Alves Xavier
Departamento de Engenharia Elétrica – DEPEL
Universidade Federal de São João del Rei - UFSJ
São João del Rei, Brasil

Abstract - Neste trabalho, busca-se a modelagem do problema de balanceamento de bancos de capacitores de alta tensão de forma a subsidiar um algoritmo rápido, apto a executar a otimização rápida do balanceamento com o número mínimo de substituição de unidades, aliando tempo reduzido de intervenção, com aumento de confiabilidade e vida útil do banco de capacitores.

Index Terms – Banco de Capacitores; Balanceamento de Capacitâncias; Metaheurística, Busca Tabu.

I. INTRODUÇÃO

A eficiência energética de um sistema elétrico depende em grande medida do fator de potência com que opera e de uma eficaz compensação da potência reativa [1]. Isto é, a disponibilização de reativo é um dos principais problemas relacionados à operação eficiente de um sistema de potência de alta tensão, seja para manter os perfis de tensão nas barras, seja para atender os requisitos de transferência de carga entre as diversas barras deste sistema.

A operação econômica dos modernos sistemas de potência requer um suporte de tensão mais distribuído do que anteriormente, as características da geração distribuída e da carga mudaram, exigindo maior suporte de Var em todo o sistema de potência [2].

Os equipamentos usuais utilizados para suprimento de reativos são: os compensadores síncronos; as máquinas síncronas; os bancos de reatores e os bancos de capacitores.

Os bancos de capacitores da subestação consistem na forma mais econômica para adicionar Vars ao sistema [2], e o método mais prático de disponibilizar grandes blocos de reativo capacitivo é por meio de bancos de capacitores de alta tensão [3].

Estes bancos são formados por dezenas ou centenas de unidades capacitivas, isto implica em: (i) maior probabilidade de falha, resultando em menor confiabilidade; (ii) maior dificuldade de manter balanceamento das capacitâncias e conseqüentemente o ajuste da proteção do banco de capacitores, quando da avaria ou substituição de alguma unidade; (iii) explosão combinatória na busca do balanceamento ótimo das capacitâncias, dado as características do problema de otimização envolvido, inviabilizando a busca do equilíbrio das capacitâncias nas intervenções de manutenção e (iv) com isto, ocorre um desbalanceamento gradual ao longo da vida útil do banco de capacitores, estabelecendo um círculo vicioso de: aumento da taxa de falhas, aumento de trocas de unidades falhadas e aumento do desequilíbrio.

Neste trabalho busca-se apresentar metaheurística apta a ser embarcada em um algoritmo que permita o balanceamento rápido do BCAT, evitando ou mitigando as causas deste círculo vicioso.

II. BANCOS DE CAPACITORES DE ALTA E EXTRA-ALTA TENSÃO - BCAT

O método mais prático de obter grandes blocos de potência reativa capacitiva (kVAr) para sistemas a partir de 2,3 kV é por

meio da montagem de banco de capacitores em estruturas metálicas, agrupando as unidades capacitivas em racks ou grupos [3].

A montagem de grandes bancos pelo agrupamento das unidades capacitivas em prateleiras metálicas interconectadas apresenta a seguintes vantagens:

- Economia: a fabricação de racks padrões resulta em baixo custo se comparada com projetos específicos para cada instalação; ou com bancos equivalentes montados em cubículos.
- Flexibilidade: os racks podem ser dispostos em várias combinações de tensão e potência, rápida e economicamente, com melhor aproveitamento de espaço, bem como em casos de alterações que se fizerem necessárias no sistema.

Tanto a unidade capacitiva ou lata – UC quanto o BCAT têm a mesma estrutura, isto é, uma seqüência de elementos conectados em grupos séries e paralelos de modo a obter a potência reativa desejada. Assim, conforme [4] a capacitância do banco de capacitores é expressa pela equação 1

$$C_{\text{banco}} = (P * C_{\text{nu}}) / S. \quad (1)$$

Onde C_{banco} representa a capacitância do banco de capacitor; P número de capacitores em paralelo por grupo série; S o número de grupos de capacitores em série e C_{nu} a capacitância nominal de cada unidade capacitiva.

A. Restrições e Balanceamento de Banco de Capacitores

Dado limitações de fabricação, as unidades capacitivas apresenta valores divergente do valor de capacitância nominal pretendido em função da potência do BCAT. A capacitância total por fase do BCAT passa a ser obtida pela equação 2:

$$C_{\text{fase}} = \sum_{p=1}^{nr} \left[\frac{1}{\sum_{g=1}^{ng} \left(\frac{1}{\sum_{l=1}^{nl} C_l} \right)_g} \right] \quad (2)$$

Em que C_l é a capacitância de placa de cada unidade capacitiva, e nl é o número total de unidades em paralelo em cada grupo-paralelo, ng é o numero de grupos séries por ramo e nr e o número de ramos por fase. Com isto, a capacitância de cada fase irá depender da combinação destes somatórios das capacitâncias das UC.

Segundo Norma NBR 2582 [5] a potência calculada a partir da capacitância medida, à tensão e frequência nominais, não deverá diferir da potência nominal de +5% e - 10% para as UC, ou seja, a diferença entre duas latas igualmente especificadas pode ser de até 15%. Também, limita o desvio entre a capacitância instalada e nominal projetada do BCAT à faixa de 0% a 10%.

De acordo com o guia IEEE Std. 18-2002 [6], os capacitores em derivação devem operar continuamente com uma tensão de no máximo 110% da nominal, permitindo uma sobre tensão de 10% sobre o Banco de Capacitores, isto é, a

tensão deve ser distribuída de forma equânime entre os grupos séries.

B. Configurações de Proteção de Bancos de Capacitores

A proteção dos bancos de capacitores de alta tensão considera eventos externos e internos [6]. Os eventos externos são os decorrentes de falhas no sistema elétrico, como as sobre tensões transitórias, e tem tratativas conforme os demais equipamentos instalados na Rede Básica.

Das falhas internas ao banco, destaca-se a queima ou falha de unidades capacitivas. Isto causa o desbalanceamento de capacitância e a elevação da tensão permanente nos demais elementos do banco podendo levar queima de elementos em efeito cascata, e a conseqüente perda do banco.

Assim a proteção para as falhas internas precisa ser muito sensível, uma vez que, na maioria das vezes, envolve pequenas variações das grandezas elétricas monitoradas [6]. Por outro lado, a ênfase em proteção de banco de capacitores em derivação é colocada em duas áreas: minimizar danos da falha e evitar operações falsas e indesejáveis [7].

O Guia IEEE C37.99-2000 apresenta as diversas filosofias de proteção do contra desbalanceamento [6]: Corrente de Neutro; Corrente de Neutro Compensada; Desbalanço por Impedância e Tensão Diferencial.

O projeto do sistema de proteção de um banco de capacitores requer um entendimento das capacidades e limitações das unidades capacitivas individuais, equipamentos elétricos associados e desempenho esperado do sistema de potência.

Para os fabricantes de bancos de capacitores o limite de desbalanço de capacitâncias é de até 0,5%, uma vez que desequilíbrios em regime até esta monta podem ser zerados pelos ajustes de compensação do sistema de proteção [6]. Ou seja, a cota superior de erro absoluto é de $0,5 \times 10^{-2}$ [pu], ou seja, da distribuição das unidades capacitivas no banco deve-se obter valores de capacitância de fase idênticos, com aproximação de no mínimo duas casas decimais corretas.

III. MODELOS METAHEURÍSTICOS

Metaheurísticas são métodos que coordenam procedimentos de busca local com estratégias de mais alto nível. O objetivo é criar um processo capaz de escapar de mínimos locais e realizar uma busca robusta no espaço de soluções. De forma geral, são utilizadas em problemas para maximizar ou minimizar uma função cujos parâmetros são limitados em um intervalo. Para chegar a uma solução, as técnicas metaheurísticas usam a combinação de escolhas ocasionais e o conhecimento de resultados anteriores adquiridos no processo para direcionar e realizar buscas na vizinhança do espaço de pesquisa, o que evita paradas desnecessárias em ótimos locais.

Segundo [8] esses métodos são aplicados para resolver problemas sobre os quais há pouca informação, mas que, uma vez oferecida uma solução candidata, esta pode ser testada. Contudo, não apresentam garantias de otimalidade. Estas técnicas têm se mostrado efetivas nas soluções de problemas complexos de grande porte e que apresentam a característica da

explosão combinatória, ou seja, ocorre um aumento computacional conforme aumenta a diminuição do espaço de busca do problema.

Os modelos baseados em metaheurísticas têm apresentado inúmeras vantagens como a baixa complexidade dos algoritmos, possibilidade de trabalhar com variáveis inteiras e não lineares, e tempo de resposta satisfatório. O sucesso destes modelos está relacionado à capacidade de evitar ótimos locais, explorando a estrutura básica de cada problema.

Dentre as principais metaheurísticas existentes estão Algoritmos Genéticos, GRASP, VNS (Variable Neighborhood Search), VND (Variable Neighborhood Descent), Busca Tabu, Colônias de formigas, etc.

Tradicionalmente, as metaheurísticas podem ser classificadas em dois grandes grupos de Algoritmos Evolucionários (Evolutionary Algorithm) e Inteligência Coletiva (Swarm Intelligence) [9]. Entretanto, algumas técnicas não compartilham as mesmas características dos grupos mencionados anteriormente e, portanto, devem ser classificados separadamente, como a Busca Tabu (Tabu Search).

A. Busca Tabu

A metaheurística Busca Tabu (BT) é um processo adaptativo empregado na solução de problemas de otimização combinatória para modificar o comportamento de heurísticas de busca local, de forma que a exploração do espaço de soluções não seja interrompida ou perturbada quando não existam deslocamentos que melhorem a solução corrente. Através de conhecimentos adquiridos durante a exploração do espaço de soluções, o método evita que mínimos locais recentemente visitados exerçam efeito atrativo à trajetória da busca, garantindo uma exploração mais inteligente quando comparado a métodos tradicionais de busca local. O método de busca tabu foi proposto por [10]. Uma descrição mais detalhada pode ser encontrada em [11][12][13]. Um algoritmo de BT é baseado nos conceitos de vizinhança, movimento, lista tabu, função de aspiração, intensificação e diversificação.

B. Vizinhança e Movimento

A vizinhança de uma solução, inicial ou atual, s é definida como o conjunto de soluções obtidas através de modificações elementares em s , chamadas de movimentos. A cada iteração, um algoritmo de BT obtém a vizinhança da solução s e a seguir identifica o seu melhor vizinho, transformando-o na solução atual. Este procedimento é empregado mesmo em caso de piora da solução, o que é interessante para evitar o aprisionamento prematuro do processo de busca em vales locais.

C. Lista Tabu e Função de Aspiração

A estratégia de realizar o movimento da solução atual para o seu melhor vizinho, mesmo quando houver piora na solução obtida, não é suficiente para escapar da obtenção precoce de ótimos locais. Para isto, é utilizada uma lista tabu, a qual é composta por regras chamadas de restrições tabus. Essas regras servem para evitar que os movimentos reversos correspondentes a movimentos realizados anteriormente sejam efetuados, prevenindo, assim, a repetição de ciclos. O tamanho

da lista tabu, geralmente chamado de tempo tabu, é um parâmetro que define por quantas iterações um movimento reverso permanecerá na lista, devendo ser cuidadosamente dimensionado para cada tipo de problema. Vê-se, então, que a lista tabu é do tipo FIFO (first in first out), ou seja, o primeiro elemento (movimento) a entrar é o primeiro elemento a sair.

Uma restrição tabu pode ser ignorada quando se identifica que o respectivo movimento levará à visita de novas soluções atrativas (e.g. quando a solução visitada é a melhor solução encontrada até o momento). Isso é determinado pela função de aspiração, a qual permite que uma solução proibida pela lista tabu seja excepcionalmente visitada.

D. Intensificação e Diversificação

A busca por soluções em uma dada região é chamada “intensificação”, pois quanto mais promissora for esta região, mais intensa será a busca. Por outro lado, quanto mais intenso se torna o processo de busca, maior será a probabilidade de ficar “preso” em uma região promissora, obtendo apenas ótimos locais.

Para evitar este aprisionamento em mínimos ou máximos locais, deve ser empregado o procedimento de diversificação, através do qual o processo de busca é reiniciado diversas vezes, a partir de novas soluções iniciais. A diversificação permite que o algoritmo faça uma busca mais abrangente, visitando regiões ainda não exploradas e tendo uma probabilidade maior de envolver todo o universo de soluções possíveis do problema.

E. Critério de parada

O algoritmo de busca tabu deve ser interrompido assim que o número máximo de procedimentos de diversificação é atingido. Por sua vez, cada procedimento de diversificação será interrompido quando o número de movimentos (somente aqueles que definem os melhores vizinhos) atingirem um valor limite, ou quando a melhor solução da presente diversificação permanecer consecutivamente a mesma após um determinado número movimentos.

IV. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

Em função das diferenças de capacitâncias projetadas e conseguidas, mesmo com o balanceamento dos capacitores, o BCAT apresenta uma diferença natural de capacitância que reflete em uma diferença de tensões, seja entre fases, ou entre os grupos séries ou paralelos.

Assim, cada BCAT possui um fator de desbalanceamento das capacitâncias único – fator K , para a parametrização da proteção interna do banco. Este coeficiente de ajuste visa evitar que a diferença natural de tensões existentes provoque atuações indevidas para condição do banco não ter nem uma unidade capacitiva falhada, isto é, o falso positivo para alarme e ou trip.

Ao longo da vida útil de um banco de capacitores ocorrem falhas internas ao longo do tempo, que retiram os elementos capacitivos de operação [14], e, na prática de manutenção atual, o capacitor avariado é substituído por uma unidade sobressalente de capacitância de placa de valor mais próximo, sem recálculo do balanceamento, levando um processo de

cumulação dos desvios da capacitância de projeto nominal, modificando o fator K.

O desequilíbrio de capacitância leva a uma redistribuição de tensão ao longo dos elementos capacitivos remanescentes, deixando-os sujeitos a uma sobre tensão permanente, que impacta em:

- Redução da vida útil da unidade capacitiva: o aumento dos estresses dielétricos nas condições de sobre tensões acelera o processo de degradação das células capacitivas, [4] que leva a queima dos elementos capacitivos internos, resultando na alteração da capacitância total da unidade capacitiva.
- Atuação indevida da proteção: a alteração do fator K, implica na sensibilização equivocada dos relés de proteção levando ao desarme indevido do banco. Isto impacta na remuneração deste ativo de transmissão, uma vez que a diferença de penalizações pecuniárias entre desligamentos programados e não programados e da ordem de dez vezes mais no atual Modelo Eletroenergético Brasileiro [15].
- Sobreaquecimento em conexões: a distribuição não uniforme da corrente nas diversas conexões acarreta em Pontos com Temperatura Anormal (PTA), queima acentuada de elos fusíveis e até mesmo derretimento e ou comprometimento das vedações. Isto acarreta no aumento no número de intervenções para manutenção, bem como a redução do tempo entre falhas.

Ao longo da vida útil de um banco de capacitores, quanto maior o número de unidades capacitivas substituídas deste a montagem inicial, maior o desbalanço de capacitância proporcionado. Assim, a importância de uma ferramenta que possibilite o balanceamento rápido e a alocação rápida das latas na manutenção do banco, de forma a obter o mínimo desequilíbrio com a mínima movimentação ou realocação das unidades capacitivas, ou seja, com o mínimo tempo de intervenção.

V. ALGORITMO DE BALANCEAMENTO

A solução de um problema de otimização é baseada em três etapas principais de projeto: (i) a codificação do problema; (ii) a função objetivo que se deseja maximizar ou minimizar e (iii) o espaço de soluções associado [16].

A. Modelagem do Problema de Alocação de Capacitores via BT

O algoritmo Busca Tabu (BT) proposto neste trabalho é composto por duas etapas básicas. A primeira etapa consiste em gerar um conjunto de soluções vizinhas à solução corrente. A segunda etapa representa a avaliação da vizinhança para busca de melhores soluções e construção de uma Memória Adaptativa que contenha somente soluções de ótima qualidade identificando a convergência do processo. A seguir será descrita cada etapa do algoritmo. A Figura 1 apresenta o fluxograma do algoritmo proposto, BT, onde pode ser observado que o este é composto por oito passos.

1) No início do processo de otimização, a LT encontra-se vazia. Partindo de uma solução inicial qualquer, inicia-se o

processo de criação dos vizinhos. No caso de balanceamento de banco capacitores a solução inicial corresponde ao banco base, o qual é composto pelas UC's instaladas ou por um conjunto de UC's definidas pelo planejador. Conforme foi definido, a função objetivo é encontrar o menor desequilíbrio máximo entre fases, o que corresponde ao melhor indivíduo (i.e., solução). Quando processo de busca é inicializado, não há informações sobre os caminhos a serem investigados. No presente trabalho adotou-se para esta etapa a busca exaustiva, ou seja, a criação de todos os vizinhos possíveis a partir do banco base, realizando apenas um movimento, ou seja, uma troca entre duas UC's.

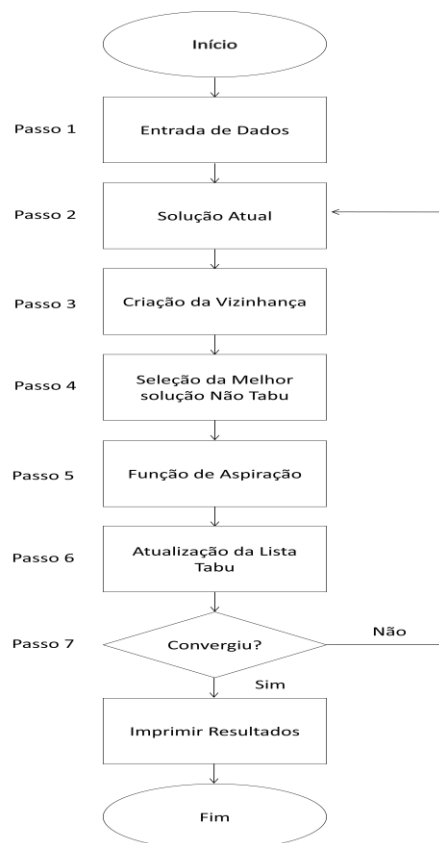


Fig.1. Fluxograma do Algoritmo BT proposto.

2) A segunda etapa do algoritmo é iniciada com o cálculo dos valores de desequilíbrio de cada vizinho. Além disso, outro critério de seleção denominado “peso de troca” é utilizado. Este critério penaliza as soluções que violaram o limite de desequilíbrio adotado pelos fabricantes que é de 0,5% ou $0,5 \times 10^{-2}$ pu em erro absoluto [6]. Em seguida, é feita a classificação dos vizinhos em ordem crescente da função de avaliação, a qual corresponde à soma do desequilíbrio máximo entre fases com o peso de troca. Feita a classificação dos indivíduos, o melhor deles será selecionado e terá seu movimento de construção avaliado, para verificar se esse está ou não na LT. Se o movimento dessa solução não estiver na LT, esse conjunto de UC's é armazenado e se tornará a nova solução atual. Porém, se o movimento for tabu, i.e., estiver na

Lista Tabu, sua função de avaliação será comparada com a melhor solução global obtida até o momento, se for menor o indivíduo torna-se a solução atual, senão a próxima solução melhor classificada da vizinhança é analisada.

VI. ESTUDO DE CASO

Para a verificação dos conceitos e métodos propostos, é utilizado um banco de capacitores típico contendo 45 unidades capacitivas (UC) de 65,13 kV, 17,64 MVar, 60 Hz e capacitância nominal por Fase de 3,6769 μ F.

Os capacitores fornecidos pelo fabricante variam de 2,713 μ F (- 2,75%) a 2,895 μ F (3,76%), que atendem os requisitos da norma NBR 2582. No entanto, dependendo da disposição das UC, é possível atingir num desbalanço de até 3,7% entre fases, frente os 0,5% admissível pelo sistema de proteção.

O banco de capacitores trifásicos utilizado é composto por 3 grupos em série por fase, e cada grupo série é composto por 4 UC's em paralelo. Portanto, das 45 UC's, 36 são instaladas no banco e as 9 restantes são reservas, para eventuais substituições ou reposições. Inicialmente, o banco tem duas unidades capacitivas falhadas, sendo a primeira instalada no banco na posição de número 36 e a segunda, na posição 37, estando entre as UC' reservas.

TABELA I. DADOS DO BANCO DE CAPACITORES

Dados do Banco de Capacitores	Potência Nominal / Efetiva	17,64/17,46 MVar
	Tensão Nominal / Efetiva	65,13/64,8 kV
	Frequência Nominal	60 Hz
	Número de grupos - série por fase	3 Grupos
	Capacitores paralelo por grupo - série	4 Unidades
	Número total de Capacitores no Banco	36 Unidades
Dados da Unidade Capacitiva	Potência Nominal Capacitor	490 kVar
	Tensão Nominal Capacitor	21,6 kV
	Capacitância Nominal Capacitor	2,79 μ F

A. Resultados

Os resultados desse trabalho foram obtidos por meio do programa computacional de balanceamento de banco de capacitores utilizando a Metaheurística BT, com as seguintes características.

1) *Função de avaliação*: a função de avaliação para o sistema adotado é representada pelas Equações (3) e (4). Além de levar em consideração o desequilíbrio máximo entre fases, a função de avaliação tem como componente o Peso de Troca, que é proporcional ao desequilíbrio máximo. Se o desequilíbrio máximo entre as fases é menor ou igual ao valor permitido (0,5% ou $0,5 \times 10^{-2}$ pu), o Peso de Troca será 1x Desequilíbrio, senão será 2xDesequilíbrio.

$$f(s) = \text{Deseq}(s) * \text{Peso Troca}(s) \quad (3)$$

$$f(s) = \begin{cases} \text{Deseq} + \text{Deseq}, & \text{Deseq} < 0,005 \\ \text{Deseq} + 2 * \text{Deseq}, & \text{Deseq} \geq 0,005 \end{cases} \quad (4)$$

2) *Critério de parada*: o processo de diversificação é interrompido após serem avaliadas 5 regiões. Para uma dada diversificação/região, a busca é interrompida após serem avaliadas 50 soluções (melhores vizinhos) ou caso não haja alteração da melhor solução após 10 movimentos consecutivos.

3) *Movimento*: corresponde à troca entre duas UC's do banco de capacitores.

4) *Vizinhança*: é composta por todos os estados que são diretamente atingidos a partir da solução corrente com a realização de um movimento. Nenhuma heurística foi utilizada para reduzir o tamanho da vizinhança. Para o sistema proposto com 36 UC's instaladas no banco e outras 9 UC's no banco reserva, são criados a cada iteração 945 vizinhos.

5) *Lista Tabu*: retém não apenas os movimentos reversos mais recentes, mas é utilizada também para inibir o acúmulo de circuitos em paralelo. Para isto, quando um circuito é adicionado a um determinado ramo, não apenas o movimento reverso irá para a lista tabu, mas também o movimento direto.

No teste apresentado a seguir a lista tabu ficou restrita a 5 movimentos.

Para análise do programa desenvolvido e confirmação de sua eficiência, são apresentados dois casos. A diferença entre eles está nas soluções iniciais, isto é, a “partida” do processo de busca é diferente entre eles. Esses casos partem de 5 soluções iniciais, sendo uma correspondente ao banco de capacitores contendo UC's avariadas e as demais são soluções iniciais aleatórias, nas quais as UC's são instaladas aleatoriamente no banco. As Figuras 2 e 3 ilustram o processo de convergência para os dois casos.

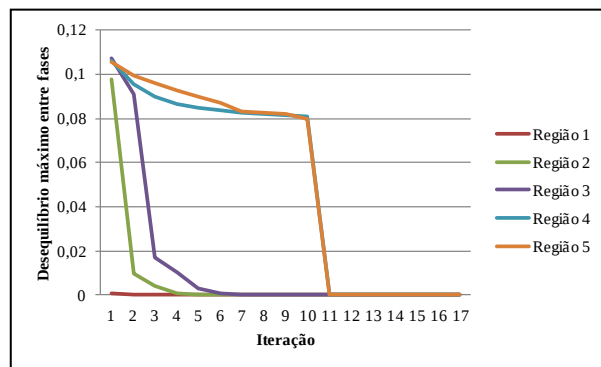


Fig.2. Gráfico de Desequilíbrio Máximo x Iteração do Caso 1

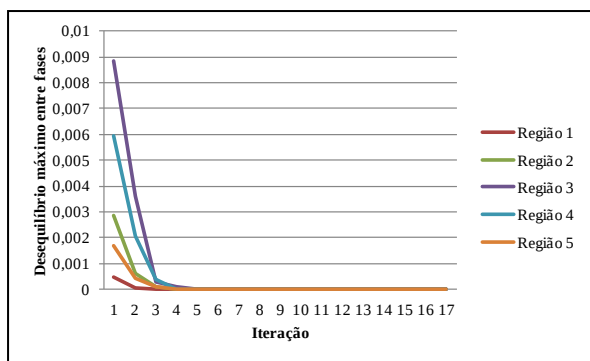


Fig.3. Gráfico de Desequilíbrio Máximo x Iteração do Caso 2

A análise das Figuras 2 e 3 obtidos pelas simulações comprova que o programa desenvolvido é eficiente. É possível perceber que independente do caminho percorrido nas simulações o resultado alcançado de desequilíbrio máximo entre as fases é menor do que a solução inicial. Além disso, a convergência do sistema é rápida e acontece nos dois casos já na décima primeira iteração.

Por fim, o principal objetivo do programa que é o balanceamento do banco de capacitores é atingido de forma satisfatória. Por exemplo, as soluções iniciais dos casos tinham desequilíbrio máximo entre fases de $4,764 \times 10^{-4}$ pu e ao fim das iterações, o desequilíbrio passou a ser de $9,710 \times 10^{-9}$ pu, ou seja, mais de dez mil vezes menores. Já em relação ao desequilíbrio máximo permitido pela norma [6], esse valor é quase um milhão de vezes menor.

VII. CONCLUSÃO

Neste trabalho apresentou-se o estudo de Bancos de Capacitores desequilibrados por meio de um algoritmo baseado na Metaheurística de Busca Tabu. O sistema teste analisado, para dois casos diferentes foi utilizado para demonstrar a validade dos modelos propostos, bem como sua capacidade de análise. Observou-se que os resultados apresentam boa qualidade, já que, houve rápida convergência, ou seja, baixo esforço computacional, além da melhora significativa nos parâmetros de desequilíbrio do sistema. Isso comprova que o algoritmo é uma ferramenta válida para análise de problemas de balanceamento de capacitores.

Como sugestão de continuidade desse trabalho pode ser a criação de outros algoritmos com diferentes Metaheurísticas, para comparação e conclusão de qual ferramenta é mais adequada ao problema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] VASCONCELLOS, D. B.; PÉREZ, I. A.; MARTÍNEZ V. L. Compensación de potencia reactiva en sistemas desbalanceados utilizando algoritmos genéticos. Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, vol. 20 N° 3, pp. 284-292, 2012.
- [2] MOXLEY R., POPE J. e ALLEN J. Proteção de Banco de Capacitores de Alta Tensão para Configurações Simples e Complexas. Apresentado previamente na 2012 Texas A&M Conference for Protective Relay Engineers.© 2012 IEEE – Todos os direitos reservados. 20120217 • TP6505-01.

[3] INEPAR S/A Indústria e Construções. Manual de Instruções: Banco de Capacitores 200 Mvar x 345 kV x 60 Hz. Documento nº 8142-02-01; 22 de Outubro de 1998.

[4] FERREIRA H. L.; LIMA M. R. M.; BRITO M. E. C. Manutenção preditiva de bancos de capacitores com base no Monitoramento da corrente de desequilíbrio de neutro. 2º Congresso Mundial de Manutenção e 19º Congresso Brasileiro de Manutenção. 2004. Disponível em: <http://www.abraman.org.br/Arquivos/96/96.pdf>.

[5] NBR 2582. Capacitores de Potência: Especificação. ABNT.

[6] SANTOS, H. L. Influência das distorções harmônicas na proteção de bancos de capacitores. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG. (2010).

[7] DHILLON Malkiat S.; TZIOUVARAS, Demetrios A. Proteção de banco de capacitores sem fusíveis usando relés digitais. Disponível em: http://www.selinc.com.br/art_tecnicos/capacitadores_sem_fusiveis.pdf.

[8] Menegasso Mansano, Elisângela – Algoritmo Busca Tabu Paralelos Aplicados ao Planejamento da Expansão da Transmissão de Energia Elétrica – Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, Ilha Solteira, SP.2008.

[9] Edgardo D. Castronuovo, Optimization Advances in Electric Power Systems. Nova Science Publishers, Inc, 2008.

[10] F. Glover, “Tabu Search – Part I”, ORSA Journal of Computing, 1, p. 190-206, 1989.

[11] F. Glover, “Tabu search – Part II”, ORSA Journal on Computing, 2, p. 04-32, 1990.

[12] F. Glover e M. Laguna, “Tabu Search”, Ed. Kluwer Academic, 1997.

[13] P. Hansen, “The steepest ascent mildest descent heuristic for combinatorial programming”. Congress on Numerical Methods in Combinatorial Optimization, Capri, Italy, 1986.

[14] SANTOS, H. L.; LANE M.R.B et all. Influência das Distorções Harmônicas na Proteção de Bancos de Capacitores: Resultados Experimentais. 189 f. SBSE-2010.

[15] ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução normativa nº 270 de 26 de junho de 2007. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2007270.pdf>.

[16] SANDRINI F.T. Otimização de Banco de Capacitores em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Usando Algoritmos Genéticos e Nuvem de Partículas. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas) – Universidade Católica do Paraná, Curitiba, PR. (2005).