

Utilização da Metaheurística GRASP como Solução para o Problema de Reconfiguração de Redes Inteligentes de Energia

Adan L. Pereira¹, Daniel J. Custódio Coura¹, Wanderley Cardoso Celeste¹

¹Departamento de Computação e Eletrônica – Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) – São Mateus – ES – Brasil

{adan.pereira, daniel.coura, wanderley.celeste}@ufes.br

Abstract. *The introduction to Smart Grids indicates a change at paradigm in the way of dealing with generation and distribution system of energy. In this way, one of the problems founds in the paradigm is to propose a method that enable the reconfiguration of an electric grid at less possible time without achieve normal operation of the system. Once identified the point at which some failure occurred, must isolate the zone where this error occurred, by opening the sectionalizing devices or circuit breakers and proceed maneuvers other Keys that will restore the power supply to the loads. Inserting in this context, the present study aims to measure the use of metaheuristic GRASP as a solution to this problem, contributing to the development of this new area of research that in a few years has proved to be promising.*

Keywords: *Metaheuristic, smart grids, reconfiguration.*

Resumo. *A introdução das Smart Grids indica uma mudança de paradigma na forma de lidar com os sistemas de geração e distribuição de energia. Dessa forma, um dos problemas encontrados neste novo paradigma está em propor um método, que permita a reconfiguração de uma rede elétrica no menor tempo possível sem atingir o funcionamento normal do sistema. Uma vez identificado o ponto no qual ocorreu alguma falha, deve-se isolar a zona onde ocorreu tal erro, através da abertura de dispositivos de seccionamento ou disjuntores, e proceder a manobras de outras chaves que permitam restabelecer o suprimento de energia às cargas. Inserindo-se nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o uso da metaheurística GRASP como solução para este problema, contribuindo para o desenvolvimento dessa nova área de pesquisa que em poucos anos já se mostrou bastante promissora.*

Palavras-chaves: *Metaheurística, redes inteligentes, reconfiguração.*

1. Introdução

Nos últimos anos o consumo da energia elétrica no Brasil cresceu de uma forma significativa. Em 2011 o consumo de energia elétrica no país cresceu 3,6%, principalmente impulsionado, pelos setores comercial, residencial e industrial que cresceram respectivamente 6,3%, 4,6% e 2,3% nesse ano. A expansão do consumo de

energia deve-se ao incremento da economia brasileira que iniciou em 2003 (Durão, 2010). Contudo, este cenário representa um fator de preocupação do ponto de vista da geração de energia elétrica (Alvim, 2011).

O Brasil possui no total 3.334 empreendimentos em operação, gerando 130,5 GW de potência, e está prevista para os próximos anos uma adição de 36.6 GW na capacidade de geração do país, proveniente dos 148 empreendimentos atualmente em construção e mais 621 outorgadas (ANEEL, 2014).

Com o surgimento de diversos tipos de fontes de energia, renováveis ou não, nasceu o termo Geração Distribuída (GD) que tem sido muito discutido no meio acadêmico e no setor elétrico, uma vez que permite a construção de pequenas fontes de geração de energia (Microrredes), independente da carga, o mais próximo possível do consumidor final, evitando assim, todos os custos e impactos inerentes à geração centralizada (INEE, 2013).

Assim, redes inteligentes, de fato, consistem em uma ou mais microrredes que interagem entre si e com um sistema de energia de maior porte, o Sistema Elétrico de Potência (SEP). As microrredes, por sua vez, são redes de energia elétrica com diversas unidades consumidoras (cargas) e diversos geradores de baixa potência estrategicamente distribuídos (Geração Distribuída – GD). Ambos, cargas e geradores, são localizados geograficamente próximos (Lasseter, 2002).

O problema de reconfiguração é um problema combinatório, não linear, multiobjetivo e sujeito às restrições operacionais e de cargas. A dimensão do espaço de busca do problema está intimamente relacionada com número de chaves envolvidas na busca de uma configuração ótima. Quanto maior o número de chaves manobráveis, mais complexa e difícil é a solução do problema (Ahuja, 2007).

Portanto, uma solução viável para tal problema consiste em encontrar um conjunto de configurações radiais que apresente o menor custo de perdas resistivas, o menor custo de confiabilidade e o menor número de manobras, respeitando sempre as restrições de níveis de tensão, capacidade de fluxo nas linhas e a potência nominal dos transformadores.

2. Reconfiguração Inteligente de Redes de Energia.

Em termos práticos, uma rede inteligente permite a automação integrada e segura das redes elétricas, dos sistemas de medição, da geração e do armazenamento distribuído de energia, de modo a permitir que a rede elétrica, por meio de análises e diagnósticos em tempo real, se reconfigure automaticamente para atender, de forma otimizada, as necessidades do sistema elétrico (Toledo, 2002).

As ações de controle tomadas para a reconfiguração de redes inteligentes estão listadas abaixo (Sioshansi, 2012):

- **Primeira ação** - Mudar o modo de operação das microrredes envolvidas;
- **Segunda ação** - Quando necessário rejeitar cargas de menor prioridade, desconectando-as da rede;
- **Terceira ação** - Manter a continuidade de atendimento a cargas com maior potência através do monitoramento do balanço de potência.

Em redes de energia as principais situações de contingência são: Comutação da microrrede para funcionar no modo de ilha; Falhas internas ou externas à microrrede; Realização de manutenção planejada; Ocorrência de desequilíbrio no balanço de potência.

Assim, a operação de reconfiguração busca isolar uma área com problemas, ao mesmo tempo em que a quantidade de cargas não supridas é minimizada (Qiao, 2009). Ou seja, a metodologia de reconfiguração de energia almeja o equilíbrio de potência com o menor percentual de rejeição de carga.

2.3. Métodos Heurísticos De Otimização

Problemas de otimização consistem em achar a melhor combinação dentre um conjunto de variáveis para maximizar ou minimizar uma função, geralmente chamada de função objetivo ou função custo. Esses problemas podem ser divididos em três categorias: aqueles cujas variáveis assumem valores reais (ou contínuos), aqueles cujas variáveis assumem valores discretos (ou inteiros) e aqueles em que há variáveis inteiras e contínuas, classificados, respectivamente, como problemas de Otimização Contínua, Otimização Combinatória ou Discreta, e Otimização Mista. Assim, para resolver esses problemas são utilizados diferentes tipos de algoritmos (Caello, 2000).

Os métodos heurísticos visam encontrar uma solução de um problema, não necessariamente a melhor, em um tempo computacional aceitável. São aplicados a problemas em que a obtenção da solução ótima é computacionalmente dispendiosa quando realizada utilizando-se métodos exatos. Existem muitos fatores que tornam interessante a utilização de algoritmos heurísticos na resolução de um determinado problema:

- Inexistência de um método exato para resolução do problema ou demanda de tempo de processamento muito alta;
- Quando a solução ótima é desnecessária, pois as soluções obtidas já são satisfatórias;
- Quando limitações de tempo e/ou dinheiro obriguem a utilização de métodos de resposta rápida;
- Como passos intermediários de outros algoritmos, potencialmente exatos ou heurísticos.

Uma metaheurística é uma estratégia de busca, não específica para um determinado problema, que tenta explorar eficientemente o espaço das soluções viáveis desse problema. São algoritmos aproximados que incorporam mecanismos para evitar confinamento em mínimos ou máximos locais. Conhecimentos específicos do problema podem ser utilizados na forma de heurística para auxiliar no processo de busca (por exemplo, na busca de um possível bom vizinho de um determinado ponto). As metaheurísticas são mecanismos de alto nível para explorar espaços de busca, cada uma usando um determinado tipo de estratégia (Blum et al, 2003).

2.4. A Metaheurística GRASP

Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP) é uma metaheurística de partidas múltiplas, proposta por Feo e Resende (1995), usada para obter soluções para problemas de otimização combinatória. O GRASP é um algoritmo iterativo composto de duas fases: uma fase de construção, na qual uma solução é gerada, elemento a elemento; e uma fase de busca local, na qual um ótimo local, na vizinhança da solução construída, é pesquisado. A melhor solução encontrada ao longo de todas as iterações GRASP é retornada como resultado.

Durante a fase de construção do GRASP deve ser utilizada uma heurística construtiva parcialmente gulosa. Basicamente, a diferença entre a heurística gulosa e a heurística parcialmente gulosa, é que nas heurísticas gulosas sempre se escolhe o melhor elemento (aquele que minimiza ou maximiza a função de avaliação) para compor a solução. Já na heurística parcialmente gulosa, a escolha do seguinte elemento é realizada de forma aleatória dentre aqueles que compõem uma lista restrita dos melhores elementos candidatos (LRC). A construção parcialmente gulosa é, portanto, caracterizada pela escolha aleatória de um dos melhores candidatos da LRC, enquanto a construção gulosa é caracterizada pela escolha do melhor elemento.

A ideia básica da metaheurística GRASP consiste em usar diferentes soluções iniciais como pontos de partida para a busca local. Desta forma, o algoritmo executa, a cada iteração, a heurística de construção parcialmente gulosa, gerando uma solução S , e, após, executa uma busca local nessa solução, gerando uma solução ótima local S' . Em seguida, é verificado se o valor, em termos de função de avaliação, dessa solução ótima local $f(S')$ é melhor que o melhor valor encontrado f^* . Em caso afirmativo, S' passa a ser a melhor solução. Esse laço se repete um número fixo de vezes (Temponi, 2007). Dessa forma, a Figura 1 apresenta um fluxograma do funcionamento da metaheurística.

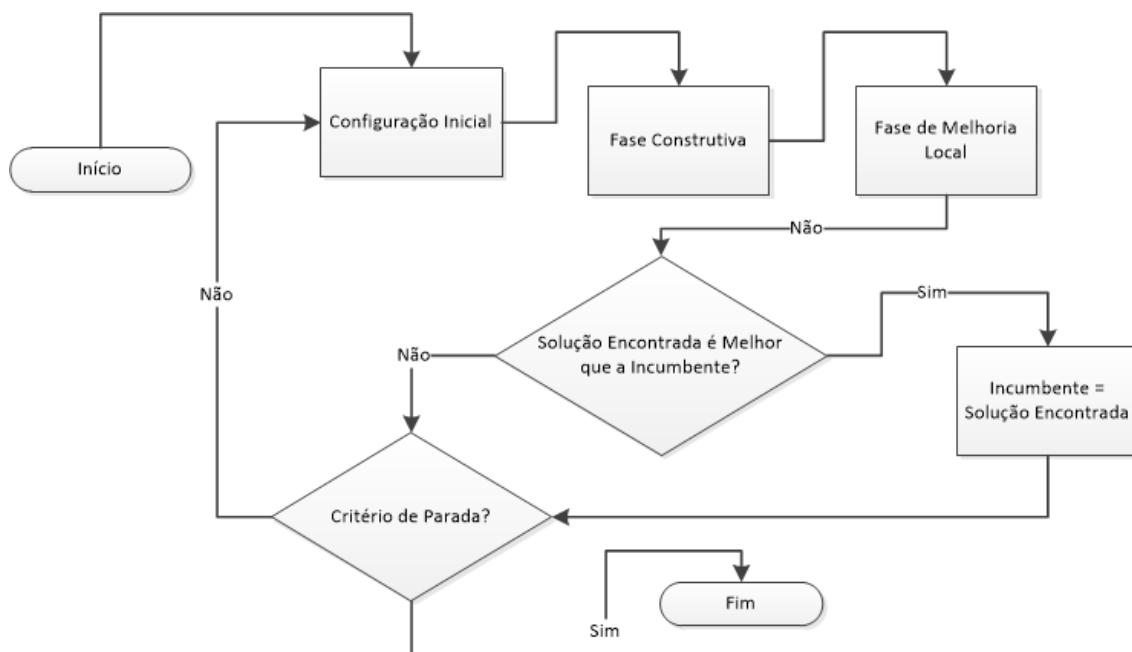


Figura 1. Fluxograma metaheurística GRASP

3. Metodologia

Os procedimentos metodológicos usados são baseados em uma abordagem qualitativa, de natureza aplicada, com um método científico indutivo e um objeto de estudo explicativo. Relativamente aos procedimentos técnicos de pesquisa, recorreu-se a pesquisa experimental. O objeto da metodologia do problema consiste na obtenção de um plano de manobras dos disjuntores existentes na rede, que permita executar a reconfiguração de forma rápida dada uma situação de contingência ou manutenção. Para resolução do problema implica: formulação do problema; definição da formula dos indicadores de desempenho; descrição da modelando microrredes como grafos descrição dos procedimentos para reconfiguração das redes de energia.

3.1. Formulação Do Problema

A representação do problema de reconfiguração de redes de energia como um modelo matemático permite a busca de objetivos como, por exemplo, minimizar potência total de cargas rejeitadas, maximizar a potência total entregue às cargas, restringir a máxima potência entregue a determinadas cargas do sistema e manter as cargas com maiores potências em funcionamento normal.

O presente trabalho utiliza a mesma função objetivo proposta por Padamati et. al . (2007) e Bento (2013) que é maximizar a potência total entregue às cargas, mantendo o balanço entre capacidade de geração e demanda das cargas não rejeitadas (balanço de potência) durante o processo de reconfiguração da rede.

Portanto a função objetivo utilizada é definida como:

$$P_{load} = Max\left(\sum_1^n L_i\right), \text{ com } n \in Z^+ \quad \text{Equação 01.}$$

Sujeito a:

$$P_{gen} \geq P_{load}$$

Onde,

P_{load} é a potência total entregue às cargas;

L_i corresponde a potência da carga;

P_{gen} é a capacidade de geração total disponível após o isolamento da falha.

A função de avaliação do problema possui dois objetivos com diferentes fatores de ponderação, a potência e prioridade. O valor dos fatores é selecionado para definir se a decisão de rejeitar cada carga será mais influenciada pela potência ou pela prioridade individual de cada carga do sistema. A magnitude da função de avaliação também depende da configuração \mathbf{X} de cada disjuntor.

Assim, a função de avaliação pode ser modelada como:

$$f(\mathbf{x}) = W_M \mathbf{xIL}^t + W_P \mathbf{xPL}^t \quad \text{Equação 02.}$$

onde:

- $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]$ representa um vetor onde cada elemento corresponde ao estado de um disjuntor. Quando $X_i=1$ indica que o disjuntor está fechado e $X_i=0$ indica que o disjuntor está aberto, com $i = 1,2,\dots,N$;

- $\mathbf{I}^{n \times n}$ representa uma matriz identidade;
- $\mathbf{L} = [L_1 \quad L_2 \quad \dots \quad L_n]$ representa um vetor com os valores de potência de cada carga;
- $\mathbf{P}^{n \times n}$ representa uma matriz diagonal com as devidas prioridades de cada carga;
- \mathbf{W}_p e \mathbf{W}_n fatores de ponderação para seleção de cargas com base na prioridade e na magnitude da carga, respectivamente, Assim $\mathbf{W}_p + \mathbf{W}_n = 1$.

3.2. Indicadores de Desempenho

Assim como vários autores da revisão bibliográfica, este trabalho também utiliza indicadores de desempenho, uma vez que, são ferramentas imprescindíveis em sistemas sujeitos a critérios de otimização. Eles permitem uma análise quantitativa e objetiva de distintas soluções aplicadas a um mesmo problema. Logo, são formalizados a seguir alguns Indicadores de Desempenho simples e objetivos, os quais atendem a necessidade presente (Padamati *et al.* (2007) e Bento e (2013)).

Seja

$$C_i = \sum_{k=0}^N g(k) \quad \text{Equação 03.}$$

Onde,

C_i é a Capacidade de Geração Instalada;

N é o número de geradores de uma microrrede;

$g(k)$ é a potência de um gerador k .

Seja,

$$C_n = \sum_{k=0}^M l(k) \quad \text{Equação 04.}$$

Onde,

C_n é a Carga Atendida da rede em Estado Normal;

M é o número de cargas presentes na microrrede;

$l(k)$ é potência de uma carga k da microrrede.

Agora, tomando C_n e C_i pode-se definir o Fator de Utilização em Estado Normal como:

$$f_n \equiv \frac{C_n}{C_i} \quad \text{Equação 05.}$$

É importante destacar que quanto mais próximo f_n for de 0 (zero) maior será capacidade de a microrrede exportar energia. Neste caso, a microrrede terá alta capacidade de se recuperar de situações de falha sem sofrer grandes perdas de atendimento de cargas. Entretanto, quando o f_n de uma microrrede está próximo de 1 (um) qualquer falha no sistema pode implicar em uma necessidade iminente de importação de energia e/ou perda de atendimento de carga conectada à rede.

Outra definição importante é o C_R (Fator Carga Atendida após Reconfiguração).

Seja,

$$C_R = \sum_{k=0}^{M'} l(k) \quad \text{Equação 06.}$$

Onde, C_R é Fator Carga Atendida após Reconfiguração;

M' é o número de cargas em uma microrrede que são atendidas

$l(k)$ é potência de uma carga k da microrrede.

Assim é possível definir o Fator de Utilização após Reconfiguração como:

$$f_R \equiv \frac{C_R}{C_i} \quad \text{Equação 07.}$$

Portanto, o Índice de Carga Atendida como:

$$I_{CA} \equiv \frac{f_R}{f_n} \quad \text{Equação 08.}$$

Substituindo as equações anteriores a equação que melhor representa I_{CA} será:

$$I_{CA} = \frac{C_R}{C_n} \quad \text{Equação 09.}$$

Algumas que considerações sobre o I_{CA} estão listadas abaixo:

- Quanto mais próximo I_{CA} estiver de 0 (zero), pior é a consequência após falha;
- Quanto mais próximo o I_{CA} estiver de 1 (um), menor é tal consequência após falha;
- Quando o valor de $I_{CA} = 1$ implica afirmar que, após uma falha ou manobra de manutenção da rede, nenhuma carga que estava sendo atendida antes do evento deixou de ser atendida após tal evento.

Portanto, pode-se usar o I_{CA} para comparar as diversas soluções encontradas, de modo que, aquela cujo I_{CA} mais se aproxima de 1 (um) será a mais eficiente. Obviamente que as soluções deverão considerar critérios idênticos, no caso, prioridade das cargas e potência demandada.

3.3. Modelando Microrredes Como Grafos

Em termos gerais, grafos são muito utilizados para modelar sistemas reais, neste trabalho a representação de grafos é utilizada para modelar os componentes das redes de distribuição de energia. Nestes podem estar incluídos os geradores, barramentos, cabos e cargas. Modelar objetos como grafos permite uma representação arbitrária das relações entre as entidades. Para isso, neste trabalho foram considerados como vértices de um grafo: as Microfontes, barramentos, cargas e baterias. Já os disjuntores estão dispostos como arestas.

3.4. Procedimentos Para Reconfiguração Das Redes De Energia

O objetivo da operação de reconfiguração de redes de energia consiste em manter as cargas mais importantes do sistema no estado de pré-falha e, somente se necessário, rejeitar carga.

Para realização do cálculo do balanço de potência de cada zona de proteção, a metodologia de reconfiguração substitui a potência fornecida em tempo real por cada

gerador pela respectiva capacidade nominal, tal procedimento foi realizado em Bento (2013) e em Padamati *et al.* (2007) Porquanto, quaisquer zonas que não estejam com problema e que não tenham capacidade de geração suficiente para compensar o fluxo de potência que antes era fornecido por regiões que agora estão com falha devem ser conectadas a outras regiões que estejam funcionando corretamente, a fim de manter o atendimento as suas cargas conectadas à microrrede.

O algoritmo definido para a reconfiguração da rede de energia determina através de uma busca heurística se a configuração da rede, após a(s) falha(s), possui balanço de potência adequado. Se qualquer subsistema da rede inteligente, localizado por busca heurística, possuir déficit de potência após todas as conexões possíveis de zonas, as cargas menos prioritárias desse subsistema são rejeitadas, a fim de minimizar a perda de fornecimento de energia para as cargas mais importantes. Dessa forma a aplicação da metaheurística GRASP pode determinar os dados da rede após a falha, um caminho com balanço de potência positivo e por fim a rejeição necessária de uma possível carga.

4. Resultados e discussões

A metaheurística GRASP foi implementada em Matlab assim como as demais implementações das referências deste trabalho, e para testes de implementação foram analisados os casos do SPS de 8 barras. Tais microrredes foram estudadas em Padamati *et al.* (2007), Bento (2013) e Shariatzadeh (2011) . A metodologia de reconfiguração depende diretamente de um mecanismo de tomada de decisão baseado na metaheurística GRASP. Tal mecanismo é acionado toda vez que há desequilíbrio negativo no fluxo de potência, ou seja, a demanda é maior do que a oferta de energia. Assim, o sistema deve decidir por uma configuração que atenda as cargas mais prioritárias, desligando as de menor prioridade em último caso. Como forma de avaliação dos resultados foram apresentados os índices de desempenho, que permitem avaliar de forma quantitativa e bem objetiva o quão afetado o sistema foi após uma reconfiguração realizada.

O cenário indicado na Figura 2 indica a disposição dos Componentes da rede SPS de 8 Barras e em seguida a Tabela 1 descreve os resultados dos cenários aqui tratados apresentando respectivamente o barramento com Falha, a carga atendida após reconfiguração (CR), o fator de utilização após a reconfiguração (f_R), o índice de carga atendida utilizando a metaheurística GRASP (I_{CA}) e o índice de carga atendida (I_{CA-B}) encontrada em Bento (2013).

O primeiro cenário de teste foi promovida uma falha no barramento Bus1, como resultados todos os componentes adjacentes da rede foram isolados e desconectando, inclusive, a carga *Load* 1 e o gerador G1. Com isso, cargas e geradores ainda interconectados foram submetidos a um balanço de potência negativo: a capacidade de geração disponível é de 44kW, enquanto a demanda das cargas é de 46kW. Um segundo cenário foi montado indicando uma falha no BUS 5, e o sistema de proteção atuou isolando-a, e desconectando, inclusive, a carga *Load* 4 e o gerador G3.

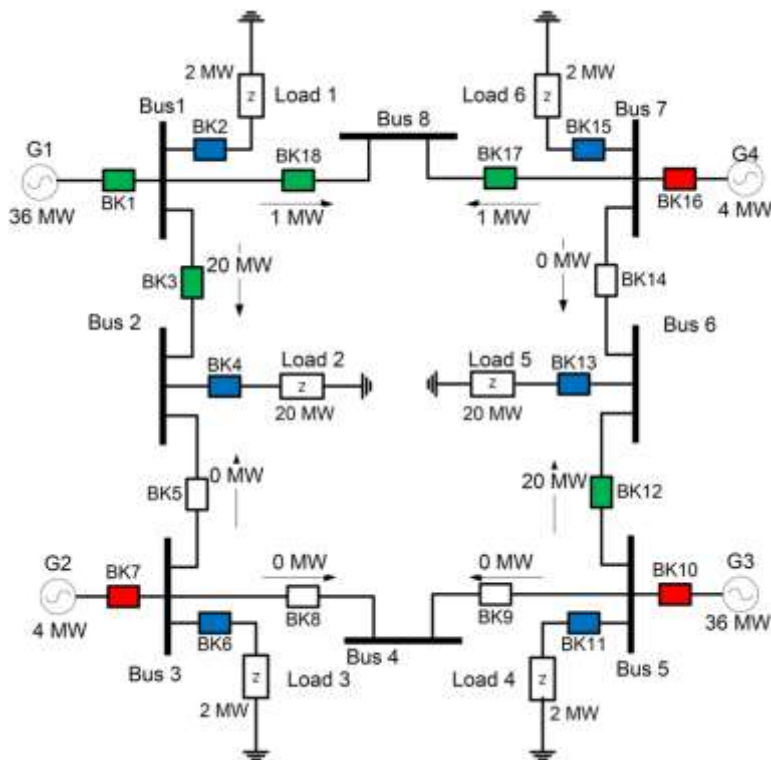


Figura 2. Componentes da rede SPS de 8 barras

Barramento com Falha	C_R	f_R	I_{CA}	I_{CA-B}
Bus 1	44	0,55	0,917	0,92
Bus 5	44	0,55	0,017	0,92
Bus 1 e Bus 3	24	0,3	0,5	0,5
Bus 1 e Bus 5	4	0,05	0,083	0,08

Tabela 1 – Resultados da análise da rede SPS de 8 barras

O terceiro cenário foi montado indicando uma falha no barramento 1 e 3. Assim o sistema atuou isolando cada uma das partes e rejeitando a carga *Load 2*. O Quarto cenário foi montado indicando uma falha no barramento 1 e 5. Assim o sistema atuou isolando cada uma das partes e rejeitando as cargas *Load 5* e *Load 2*.

Os resultados se mostraram bastante satisfatórios e se comparados com os mesmos cenários criados por Padamati *et al.* (2007) e analisados por Bento (2013) percebe-se a presença de valores aproximados nos valores finais de I_{CA} e I_{CA-B} . Tais semelhanças podem ser vistas, pois em ambos os casos estes cenários foram aplicadas a uma rede pequena e sem restrição de tempo, ou seja, as soluções encontradas não diferem da solução ótima do problema apresentado.

O método utilizado neste artigo como proposta para resolução do problema de reconfiguração, o GRASP, é atualmente considerado como uma das melhores metaheurísticas para problemas de otimização combinatória de elevada complexidade computacional (Problemas NP-Completo e NP-Difícil) e mostrou-se tão eficiente quanto as demais técnicas utilizadas nos trabalhos da literatura, tal desempenho pode ser comprovado pela aproximação dos índices de avaliação da reconfiguração dos cenários submetidos a testes das microrredes SPS 8 Barras.

Como visto na literatura, vários conceitos e módulos de aperfeiçoamento têm sido propostos para melhorar as soluções da metaheurística GRASP. As principais contribuições podem ser vistas como: reconexão por caminhos, GRASP Reativo, Memória de longo prazo e Filtro. Tais contribuições servem de motivação para melhorias da implementação da metaheurística em pesquisas futuras, buscando tornar o GRASP cada vez mais adaptativo.

Para pesquisas futuras sugere-se que se aplique a metodologia desenvolvida a sistemas testes com aproximadamente 100 barras, realizando uma boa aproximação com os sistemas de distribuição de energia reais. E por fim, que se implemente a restrição de tempo buscando uma solução não ótima, mas boa o bastante para um tempo de busca de reconfiguração mínimo ou imperceptível.

5. Referências

- Ahuja, A., Das, S. & Pahwa, A., 2007. An AIS-ACO Hybrid Approach for Multi-Objective Distribution System Reconfiguration. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, 22(3).
- Alvim, A. C. F. Desafios e perspectivas de p&d na geração de energia elétrica. Revista Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL. P&D, v. ISSN 1981-9803, p. pg.12, Junho 2009.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Banco de informações de geração - Capacidade de geração do Brasil. 2012. Disponível em < <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm> > Acesso em 1 Agosto 2014.
- Bento, F. R. O. Uma metodologia para reconfiguração de redes inteligentes. Espírito Santo 2013. Mestrado em Energia. Universidade Federal do Espírito Santo - Centro Universitário Norte Espírito Santo, pp.125.
- Blum, C.; ROLI, A. Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. 308. *ACM Computing Surveys*, v. 35, p. 268 - 308, 2003.
- Coello, C. An updated survey of ga-based multiobjective optimization techniques. *ACM Computing Surveys*, v. 32, p. 109-143, 2000.
- Durão, V. Ainda há muita desigualdade a reduzir. ADITAL. Brasil. 20 Dez 2010. Disponível em: <http://site.adital.com.br/site/noticia.php?lang=PT&cod=53246-1> Acessado em 25 Fevereiro de 2013.
- INEE. Instituto nacional de eficiencia energetica. O que é geracao distribuida. 2013. Disponível em < <http://www.inee.org.br/forumgerdistrib.asp> >. Acesso em 30 Agosto de 2013. Lasseter, R. H. Microgrids. Consortium for Electric Reliability Technology Solutions, 2002.
- Padamati, r. K., schulz, n. N. & srivastava, A. K. Application of Genetic Algorithm for Reconfiguration of Shipboard Power System. In: Power Symposium, 2007. NAPS '07. 39th North American. Las Cruces. 2007
- Qiao, y.; luz.; mei, S. Microgrid reconfiguration in catastrophic failure of largepower systems. In International Conference in Sustainable Power Generation and Supply, Nanjing, China 2009.
- Shariatzadeh, f., zamora, r. Real Time Implementation of Microgrid Reconfiguration. In: North American Power Symposium (NAPS). USA. p.1-62011. 2011.
- Sioshansi, f. P. Integrating renewable, distributed & efficient energy. Academic Press - Elsevier. pp.150. 2012.
- Temponi, E. C. C. Uma proposta de resolução do problema de corte bidimensional via abordagem metaheurística. Minas Gerais 2007. CEFET-MG.
- Toledo F.; Desvendando as redes elétricas inteligentes, Smart Grid Handbook, Brasport, Rio de Janeiro, pp. 336. 2012. ISBN: 978-857452419.