

RESTAURAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA CONSIDERANDO GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Waldemar Pereira Mathias Neto

wpmathiasn@yahoo.com.br

José Roberto Sanches Mantovani

mant@dee.feis.unesp.br

Fábio Bertequini Leão

bertequini@yahoo.com.br

Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica – LaPSEE

Departamento de Engenharia Elétrica – UNESP – Ilha Solteira

Avenida Brasil, 56 – Centro

15.385-000 ILHA SOLTEIRA, SP, BRASIL

RESUMO

Neste trabalho propõe-se um algoritmo para a restauração de redes de distribuição de energia elétrica em tempo real baseado na meta-heurística GRASP (Greed Randomized Adaptive Search Procedure) considerando a inserção de geradores distribuídos. O problema é modelado como não linear inteiro misto e considera os dois principais objetivos da restauração de redes de distribuição: minimizar número de consumidores sem fornecimento e o número de chaveamentos. O algoritmo proposto é implementado em linguagem de programação C++ e testado em um sistema real de distribuição de grande porte. A partir dos resultados obtidos verificou-se o bom desempenho do algoritmo, tanto em termos de robustez quanto em performance computacional, ao encontrar um conjunto de soluções factíveis e de boa qualidade, dentro de um tempo considerado adequado para o problema.

PALAVRAS CHAVE. Restauração de redes de distribuição. Geração distribuída. GRASP. PO na área de Energia Elétrica.

ABSTRACT

This paper proposes a methodology to distribution power system restoration considering distributed generators installed on the system. The methodology is based on GRASP (Greed Randomized Adaptive Search Procedure) metaheuristic and the restoration problem is established as nonlinear mixed-integer taking account two mainly goals: minimizing both the number of consumers without supply and the number of switching. The methodology is implemented in C++ programming language and tested using a bulk real-life distribution power system. The results show the methodology is able to provide a set of feasible and good quality solutions in a suitable time for the problem.

KEYWORDS. Distribution power systems restoration. Distributed generation. GRASP. Operational research in electric energy.

1. Introdução

O conceito de radialidade dos sistemas de distribuição de energia elétrica está passando por uma profunda reformulação, incentivada, principalmente, pelo desenvolvimento tecnológico ocorrido nos últimos anos e a nova tendência mundial de gerar, transmitir e distribuir energia de maneira eficiente e sustentável. Se, por um lado, a tecnologia contribui para a digitalização e a automação de equipamentos e procedimentos dos sistemas de distribuição, por outro, as novas políticas energéticas envolvem aspectos ambientais, econômicos e regulatórios. Neste contexto, a possibilidade de inserir pequenas fontes, principalmente renováveis, dispersas ao longo das redes de distribuição surge como uma alternativa para atender as atuais políticas energéticas e um dos fatores preponderantes para a realização destas transformações.

A denominada Geração Distribuída (GD), inserida no impreciso conceito de *Smart Grids* (redes inteligentes), é uma perspectiva mundial para projetos de pesquisa na área de distribuição de energia elétrica. Segundo Dugan e McDermott (2002), a quantidade de geradores dispersos conectados às redes de distribuição tende a crescer com o passar dos anos e, muito provavelmente, alavancada por instalações de geradores de backup em unidades industriais, novos e sustentáveis projetos arquitetônicos comerciais e pela redução dos custos dos pequenos sistemas de geração, e conseqüente redução do tempo de *payback*¹ em unidades residenciais.

Se por um lado a inserção de microgeradores contribui para o aumento da confiabilidade do sistema (MCDERMOTT; DUGAN, 2003), por outro, aumenta a complexidade da operação e do planejamento da operação destes sistemas. Os principais pontos ainda incertos estão relacionados à proteção de sobrecorrente e a operação de dispositivos de ação automática, tais como, religadores e seccionadores. No entanto, a possibilidade de operar o sistema de forma ilhada após uma falha casual, ou seja, manter um ou mais blocos de carga abastecidos por um ou mais geradores dispersos, surge como uma interessante alternativa para garantir o fornecimento de energia elétrica à parcela do sistema que foi desenergizada indiretamente pela falta, devido à atuação de um dispositivo de proteção.

Entretanto, as pesquisas destinadas a resolver o problema de restauração de redes de distribuição de energia elétrica considerando geradores distribuídos (GDs) não possuem uma bibliografia consolidada, e os trabalhos científicos ainda estão direcionados a analisar os benefícios, os efeitos e a confiabilidade dos sistemas de distribuição quando inseridos num cenário com microgeradores conectados em redes de média ou baixa tensão (CHIRADEJA; RAMAKUMAR, 2004; GOMEZ; MORCOS, 2008; KUNDU, 2008). Pham et. al. (2009) e Thian, Zhang e Xu (2009) foram os primeiros pesquisadores a estabelecerem, de maneira consolidada, propostas de solução para este complexo problema de otimização combinatória.

Pham et. al. (2009) estabeleceram uma adaptação do algoritmo “branch and bound” para maximizar a potência servida considerando a prioridade da carga. A metodologia é dividida em três etapas: inicialmente as seções próximas aos GDs e às chaves de interconexão com outros alimentadores são re-estabelecidas; em um segundo momento, denominado “expansão” do sistema, seções vizinhas que operam de forma ilhada e possuem valores semelhantes de frequência, nível de tensão e ângulo de fase são interconectadas; por fim as seções restantes são sincronizadas e interligadas.

Tian, Zhang e Xu (2009) desenvolveram um algoritmo especializado baseado na meta-heurística “Particle Swarm” para minimizar o montante de potência sem fornecimento e as perdas do sistema após a restauração. Os autores transformam o problema multiobjetivo em um problema mono-objetivo através do método de coeficiente de pesos. A metodologia foi testada em um pequeno sistema radial de treze nós e dois geradores distribuídos encontrando resultados satisfatórios.

Neste trabalho o problema de restauração de redes de distribuição é formulado como um problema de programação não linear e contempla variáveis reais e inteiras. A técnica de solução é baseada na meta-heurística GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedures)

¹ Tempo decorrido entre o investimento nos equipamentos necessários à geração de energia elétrica e o momento no qual a economia acumulada da energia gerada se iguala ao valor deste investimento inicial.

e utiliza como ferramenta auxiliar um algoritmo de fluxo de potência monofásico (CHENG; SHIRMOHAMMADI, 1995).

Para ilustrar a eficiência do algoritmo GRASP proposto para restauração de redes de distribuição com GD são apresentados e discutidos resultados obtidos a partir de testes realizados em um sistema real de distribuição.

2. Modelo Matemático

A maioria dos sistemas de distribuição é projetada para operar de forma radial, assim, para uma determinada configuração, o sistema possui um conjunto de circuitos que estão energizados, formando uma topologia radial chamada de árvore do ponto de vista da teoria de grafos. Por outro lado, os circuitos que não estão energizados são chamados de ramos de ligação, e uma troca adequada de um ramo de ligação com um ramo da árvore gera uma nova configuração radial. Uma falha ou curto-circuito em um determinado ponto da rede faz com que um dispositivo de proteção a montante do defeito atue, deixando toda carga (consumidores) conectada a jusante daquele equipamento sem fornecimento de energia elétrica.

O problema de restauração consiste em restabelecer o máximo da carga que está fora de serviço devido à contingência através do menor número possível de chaveamentos na rede. No entanto, após o restabelecimento, o sistema deve manter a qualidade do produto (quanto ao nível de tensão) e garantir uma operação segura, isto é, evitar novas interrupções devido a sobrecargas no sistema durante o intervalo de tempo t necessário para efetuar os reparos na rede, além de manter a radialidade, característica inerente aos sistemas aéreos de distribuição de energia elétrica. Assim, ao modelo matemático é necessário incluir restrições quanto aos níveis de tensão de fornecimento, máximo fluxo de corrente aos equipamentos e condutores, máximo fluxo de potência nos transformadores da subestação, limite de mínima e máxima potência gerada pelos geradores distribuídos, equilíbrio entre a produção e o consumo de energia, além de radialidade do sistema de distribuição. As funções objetivo propostas e as restrições do problema de restauração são apresentadas a seguir.

Funções objetivo

a. Minimizar o número de consumidores fora de serviço:

$$\text{Min } f_1(\bar{X}) \quad (1)$$

em que \bar{X} é o vetor de estado das chaves seccionadoras e $f_1(\bar{X})$ é o número de consumidores sem fornecimento quando as chaves da rede se encontram no estado \bar{X} . Por exemplo, $\bar{X} = [S_1, S_2, S_3, \dots, S_{N_s}]$, em que N_s representa o número de chaves seccionadoras presentes no sistema e S_i o estado da chave seccionadora i ($S_i=1$, se chave i se encontra fechada ou $S_i=0$, se esta se encontra fechada).

b. Minimizar o número de chaveamentos para restaurar a rede:

$$\text{Min } f_2(\bar{X}) = \sum_{i=1, N_s} |S_i - S_i^0| \quad (2)$$

em que $f_2(\bar{X})$ é o número de chaveamentos realizados quando as chaves da rede se encontram no estado \bar{X} , S_i^0 representa o estado inicial da chave i .

Restrições

a. O nível máximo de fluxo aos equipamentos e/ou condutores deve ser mantido abaixo do seu limite operacional:

$$I_i^t \leq I_i^{MAX} \quad (3)$$

em que I_i^{MAX} é a corrente máxima admissível do equipamento ou condutor i da rede, e I_i^t é o fluxo de corrente que efetivamente percorre aquele dispositivo durante o período t após a restauração.

b. O nível máximo de fluxo de potência nos transformadores da subestação deve ser mantido abaixo do seu limite operacional:

$$S_j^t \leq S_j^{MAX} \tag{4}$$

em que S_j^{MAX} é a potência máxima admissível ao transformador j da subestação, e S_j^t é o fluxo de potência que efetivamente percorre aquele transformador durante o período t após a restauração.

c. Os níveis de tensão em todo sistema devem estar dentro de faixas aceitáveis determinados pelos órgãos reguladores:

$$V^{MIN} \leq V_k^t \leq V^{MAX} \tag{5}$$

em que V^{MIN} é a tensão mínima e V^{MAX} é a tensão máxima admissível ao sistema de distribuição, e V_k^t é o nível de tensão em um ponto k da rede durante o período t após a restauração.

d. A potência ativa fornecida pelos geradores distribuídos deve ser mantida dentro de seus limites operacionais:

$$P_m^{MIN} \leq P_m^t \leq P_m^{MAX} \tag{6}$$

em que P_m^{MIN} é a potência mínima, P_m^{MAX} é a potência máxima e P_m^t é a potência fornecida pelo gerador m durante o período t após a restauração.

Os valores de P_m^{MIN} e P_m^{MAX} dependem da fonte de recurso e tecnologia considerada. Na tabela 1 é apresentado um resumo das restrições de potência mínima e máxima para os geradores distribuídos empregados neste trabalho.

Tabela 1: Restrições de mínima e máxima potência ativa para diferentes fontes/tecnologias consideradas.

Tipo	Tecnologia	P^{MIN} (W)	P^{MAX} (W)
Hidráulica	Turbina do tipo Francis com controle de velocidade acoplada a gerador síncrono	$0,5 \cdot P_{turbina}^{MAX}$	$\min(10^4 \cdot h_L \cdot q^t \cdot \eta; P_{turbina}^{MAX})$
Eólica	Turbina do tipo horizontal com controle de pitch acoplada gerador síncrono de ímã permanente e conectada à rede através de conversores estáticos	0	Curva de potência do conjunto turbina/gerador especificado (Figura 1)
Solar	Painel fotovoltaico conectado à rede através de conversores estáticos	0	$P_{STC} \cdot \frac{G^t}{G_{STC}} (1 + \gamma(T^t - T_{STC}))$

As restrições de máxima de potência ativa, para cada tipo de gerador distribuído (GDO), são calculadas em função da disponibilidade do recurso local (água, vento, sol). No caso dos geradores hidráulicos, h_L representa a altura líquida da queda d'água (m), q^t é a vazão turbinável (m^3/s) durante o período t , em horas, η é o rendimento global da conversão hidráulica (turbina/gerador) e $P_{turbina}^{MAX}$ indica a restrição máxima potência turbinável. A restrição de mínima potência gerada pela fonte hidráulica é a adotada por restrições de mínima vazão turbinada (ESHA, 2004).

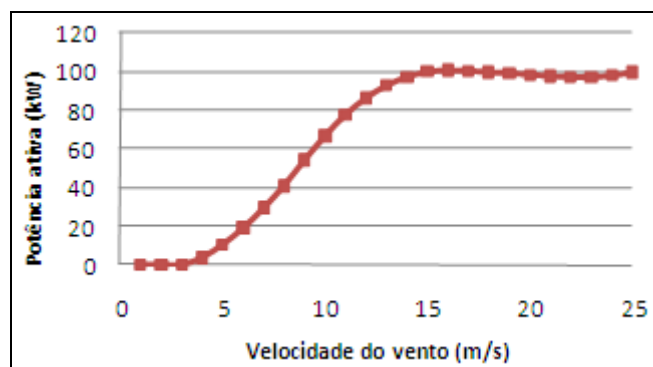


Figura 1: Máxima potência ativa para uma turbina eólica de 100 kW.

Para os geradores fotovoltaicos, P_{STC} é a potência, em watts, gerada pelo módulo quando submetido à radiação G_{STC} e temperatura T_{STC} padrões do teste STC (Standard Test Conditions). O fator de correção para temperatura é representado por γ e admitido entre o intervalo $-0,005\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ a $0,003\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ (MENICUCCI; FUENTES, 2002, 2007). As variáveis da equação são a temperatura instantânea do módulo T^t ($^{\circ}\text{C}$) e a irradiação no plano inclinado G^t (W/m^2).

e. O fator de potência dos geradores distribuídos deve ser mantido dentro de seus limites operacionais:

$$\cos(\phi)_m^{MIN} \leq \cos(\phi)_m^t \leq \cos(\phi)_m^{MAX} \tag{7}$$

em que $\cos(\phi)_m^{MIN}$ é o fator de potência mínimo, $\cos(\phi)_m^{MAX}$ é o fator de potência máximo e $\cos(\phi)_m^t$ é o fator de potência do gerador m durante o período t , em horas, após a restauração.

Os valores de $\cos(\phi)_m^{MIN}$ e $\cos(\phi)_m^{MAX}$ também dependem da fonte de recurso e tecnologia considerada. Na tabela 2 é apresentado um resumo das restrições de fator de potência mínimo e máximo para os geradores considerados neste trabalho.

Tabela 2: Restrições de mínima e máxima potência reativa para diferentes fontes/tecnologias consideradas.

Tipo	Tecnologia	$\cos(\phi)^{MIN}$	$\cos(\phi)^{MAX}$
Hidráulica	Turbina do tipo Francis com controle de velocidade acoplada a gerador síncrono	$\pm 0,8$	1,0
Eólica	Turbina do tipo horizontal com controle de pitch acoplada gerador síncrono de imã permanente e conectada à rede através de conversores estáticos	$\pm 0,9$	1,0
Solar	Painel fotovoltaico conectado à rede através de conversores estáticos	$\pm 0,9$	1,0

As restrições de mínimo e máximo fator de potência, para cada fonte, são adotadas a partir de valores encontrados na literatura (KUNDUR, 1994; NORTHERNPOWER, 2009; SAMLEX POWER, 2009).

f. Equilíbrio entre a produção e o consumo após a restauração:

$$\sum S_j^t + \sum S_m^t = \sum S_l^t \tag{8}$$

S_l^t é a potência consumida na seção l durante o período t , em horas, após a restauração.

g. A configuração do sistema de distribuição após a restauração deve ser mantida radial.

3. Técnica de Solução

A designação GRASP surgiu em 1989 por meio dos autores Thomas A. Feo e Maurício G. C. Resende, embora muitos outros autores já utilizassem algoritmos gulosos ou semígulosos para tratar os mais diversos problemas de otimização. No entanto foi através do problema de cobertura de conjuntos (FEO; RESENDE, 1989) que os autores descreveram as etapas básicas desta técnica e o apresentaram como uma alternativa simples de se obter resultados de boa qualidade para problemas de difícil, ou até mesmo impossível, modelagem através de técnicas de otimização clássica. Atualmente este algoritmo é amplamente difundido e utilizado como uma poderosa ferramenta de otimização em diversas áreas de pesquisa envolvendo problemas combinatoriais (FESTA; RESENDE, 2009, 2009a).

Segundo os autores (FEO; RESENDE, 1995), um algoritmo GRASP é caracterizado por um processo multi-start, ou iterativo, dividido em duas fases: uma fase de construção, onde uma solução factível é obtida, e uma fase de busca local, onde um ótimo local é procurado na vizinhança da solução proposta, e então, a melhor de todas é mantida como resultado.

Aplicar estes conceitos ao problema de restauração de redes de distribuição significa que durante a fase de construção o algoritmo deve reconstruir a topologia da rede que foi desenergizada pela eventual falta. No entanto, esta reconstrução deve ser desenvolvida cuidadosamente para que não sejam violadas as restrições do problema.

As restrições a , b , d , e , f e g são naturalmente atendidas pela característica intrínseca dos métodos construtivos quando aplicados aos problemas grafo-orientados. A restrição de tensão é separada e analisada em diferentes etapas do algoritmo. Durante a fase de construção, as restrições de máxima corrente admissível para os equipamentos e condutores, máximo fluxo de potência nos transformadores da subestação, máximo fluxo de potência ativa e fator de potência nos geradores e equilíbrio entre a produção e o consumo são analisadas cada vez que um novo elemento (seção) é adicionado à solução. A restrição de máximo e mínimo nível de tensão de fornecimento é analisada somente após o processamento da sub-rotina de fluxo de potência. Embora apresentado como uma restrição, o limite mínimo da tensão nos pontos de consumo pode subjetivamente variar sem interferir na factibilidade da solução, ou seja, uma configuração que apresenta baixos níveis de tensão (ou até mesmo fora da faixa aceitável) é facultada (porém não desejável) ao operador do sistema aceitá-la ou não, a critério da conjuntura e severidade da falha.

Sistematicamente, o algoritmo GRASP dedicado ao problema de restauração de redes de distribuição pode ser apresentado em duas fases (construção e busca local) aliadas a uma sub-rotina de fluxo de potência organizado conforme a figura 2.

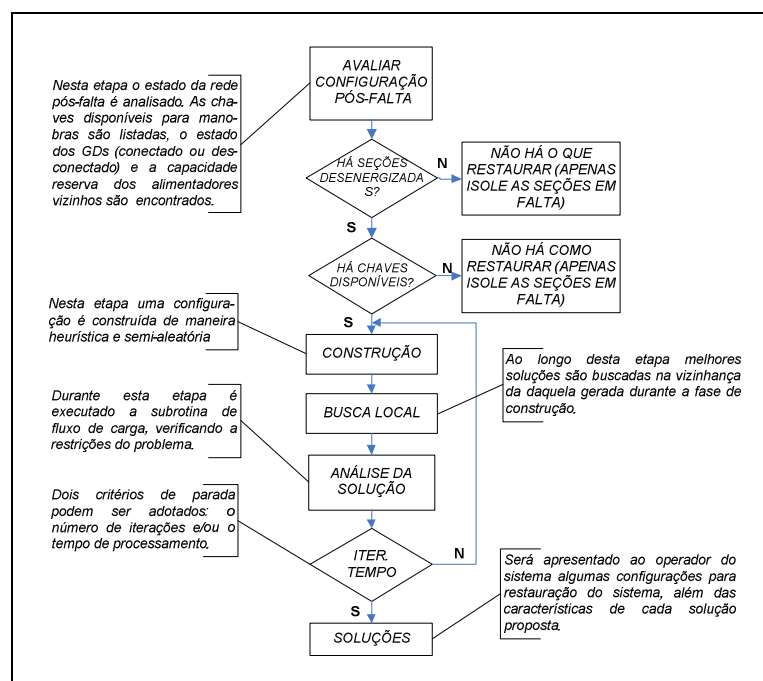


Figura 2: Algoritmo GRASP aplicado ao problema de restauração de redes.

3.1 Procedimento de construção

Resende et. al. (2008) definem o procedimento de construção GRASP como uma tarefa que realiza m passos para produzir uma solução S com m elementos, selecionando, a cada passo, um entre os n elementos presentes em um dado conjunto N .

Na típica implementação GRASP, a cada passo da fase de construção, todo elemento (presente no conjunto N) é avaliado através de uma função de mérito gulosa f pré-estabelecida, ordenados em relação à f , e inseridos em uma lista, definida pelos autores (Resende; Ribeiro, 2005) como lista de candidatos restritos (LCR). A LCR é composta por todos os elementos candidatos (presentes em N) que satisfazem o critério $f > f_{\max} - \alpha(f_{\max} - f_{\min})$, ou seja, possuem o valor da função de mérito maior que a combinação linear entre os valores máximo e mínimo (dos n elementos presentes em N), ponderada por um fator α .

Construída a LCR, um elemento da lista é escolhido aleatoriamente e inserido na solução S e, conseqüentemente, excluído do conjunto N . O processo então é reiniciado enquanto $\dim\{S\} < m$. A heurística é adaptativa porque o benefício associado a todos os elementos

(presentes em N) é atualizado a cada iteração da fase de construção para refletir as mudanças provocadas pela seleção de um elemento anterior, ao momento que a componente probabilística é caracterizada pela escolha aleatória de um dos melhores elementos desta lista, mas não necessariamente o melhor deles. Na figura 3 é ilustrado o procedimento de construção adotado.

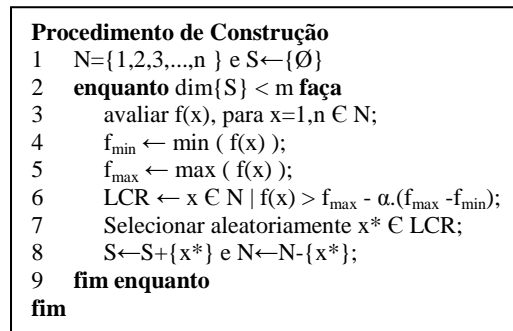


Figura 3: Procedimento de construção adotado.

Adaptar o procedimento de construção GRASP ao problema de restauração de redes de distribuição de energia elétrica considerando geração distribuída consiste em realizar, a cada iteração, o fechamento de um dispositivo de seccionamento dentre aqueles disponíveis na rede. Inicialmente considera-se que todos os equipamentos existentes entre seções desenergizadas se encontram abertos. Em seguida o algoritmo tenta restabelecer o maior número de seções (consumidores) desenergizadas até que seja atingido o limite operativo (restrições a, b, d, e e f) das linhas, equipamentos de rede ou geradores presentes no sistema.

Nesta etapa de otimização os geradores distribuídos conectados à seções desenergizadas são vistos como fontes disponíveis e capazes (caso atendam as restrições a, c, d, e, f e g) de fornecer energia elétrica a um, ou mais, blocos de carga sem fornecimento, caracterizando assim, o fornecimento de maneira ilhada à estas cargas. Neste caso os geradores operam como seguidores de carga. No entanto, os geradores conectados à seções energizadas devem operar fornecendo a máxima potência ativa disponível com maior fator de potência possível (geralmente unitário). Esta afirmativa é justificada por alguns autores (RASHID, 2007) para maximizar a potência transferida à carga, uma vez que estes geradores não possuem grande expressividade quanto à potência gerada. Neste caso os geradores operam conectados à rede.

Na figura 4 está ilustrada a configuração inicial de um procedimento de restauração de um sistema hipotético de distribuição após uma falta na seção X. O alimentador A é o alimentador principal e há possibilidades de manobras por meio dos alimentadores B e C. Nas

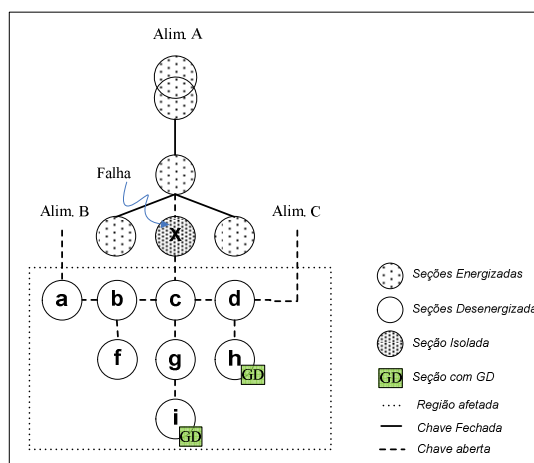


Figura 4: Exemplo de uma configuração inicial.

seções *i* e *h* existem geradores distribuídos alocados e estes podem ser utilizados durante o processo de restauração para garantir o fornecimento uma ou mais seções.

Tão logo os operadores do centro de operação de distribuição (COD) tomem conhecimento a uma falha permanente (detectada por algum programa dedicado, através de sistemas de alarmes ou sistemas de atendimento ao usuário), e indique ao algoritmo de restauração a seção atingida, o algoritmo por sua vez inicia o processamento das informações. Após a abertura das chaves adjacentes à falha, a fim de isolá-la do restante do sistema, são listadas as prováveis chaves que poderiam restabelecer as seções fora de serviço e submete as seções desenergizadas adjacentes àquelas energizadas a dois testes:

Teste 1. Se os equipamentos e/ou condutores são capazes de suportar o fluxo de corrente adicional ocasionado pela inclusão da carga desta nova seção ao longo do intervalo t (subdividido em horas), esta seção está apta a competir por sua re-energização, caso contrário será descartada. No exemplo da figura anterior, este teste significa verificar se os alimentadores B e C suportam o acréscimo de corrente dado pelas cargas conectadas às seções *a* e *d*, respectivamente.

Teste 2. Se o transformador da subestação é capaz de suportar o acréscimo de potência ocasionado pela inclusão da carga desta nova seção ao longo do intervalo t . Da mesma maneira que no teste anterior, se esta resposta é afirmativa esta seção está apta a competir por sua re-energização, caso contrário esta será descartada.

Concomitantemente, os geradores dispersos também poderiam auxiliar no processo de restauração. No entanto, para que um gerador distribuído seja considerado como uma fonte de energia capaz de abastecer um conjunto de seções é necessário, primeiramente, que este consiga atender, satisfatoriamente, durante o intervalo de tempo t , a demanda da seção em que se encontra alocado (restrições *b*, *d*, *e* e *f*) sem sobrecarregar o sistema de distribuição (restrição *a*). Se estas restrições forem atendidas, a priori, este subsistema é considerado uma fonte de energia e outras seções sem fornecimento podem ser restabelecidas.

Para que outras seções (desenergizadas), conectadas por meio de um dispositivo de manobras a uma seção (energizada) que contenha um GDo considerado como fonte, possam competir por suas re-energizações é necessário um teste adicional:

Teste 3. Se o GDo é capaz de suportar o acréscimo de potência ocasionado pela inclusão da carga desta nova seção, ao longo do intervalo de tempo t , esta seção está apta a competir por sua re-energização, caso contrário será descartada. No exemplo da figura anterior, este teste significa verificar se os geradores alocados nas seções *h* e *i* suportam o acréscimo de potência ocasionado pela inclusão das cargas conectadas às seções *d* e *g*, respectivamente.

Removidas todas as seções que poderiam causar sobrecarga ou instabilidade no sistema, as seções restantes são ordenadas em ordem decrescente em função do número total de consumidores. Utilizando novamente a figura 4 como exemplo, e admitindo que ambas as seções (*a* e *d*) foram aprovadas nos testes 1 e 2, estas são ordenadas de acordo com o número de consumidores. Da mesma maneira, e considerando que ambos GDs foram classificados como fonte, e as seções *d* e *g* foram aprovadas nos testes 1 e 3, estas também são ordenadas, juntamente com as seções *a* e *d*, de acordo com o número de consumidores. Note que neste momento a seção *d* é listada duas vezes, uma pela chave conectada ao alimentador C e outra pela chave conectada a uma seção que possui um GDo.

O próximo passo é a construção da LCR e a escolha aleatória de uma seção da lista. A LCR é composta por todas as seções desenergizadas em que há possibilidade de restauração (por exemplo, as seções *a*, $d^{\text{Alim C}}$, d^{GD} e *g* da figura anterior), aptas (satisfazem os testes 1, 2 ou 3), e ponderadas pelo fator α , ou seja, possuem valor da função de mérito f maior que $NC_{\max} - \alpha(NC_{\max} - NC_{\min})$ em que NC_{\max} e NC_{\min} são, respectivamente, o número máximo e mínimo de consumidores dentre as seções aptas.

Este procedimento (verificar quais são as seções possíveis de se restaurar, executar os testes 1, 2 ou 3 a cada seção, criar uma lista ordenada de seções em função do número de consumidores e escolher uma nova seção a ser energizada), ou seja, a fase de construção do GRASP é repetida inúmeras vezes até que todo o sistema seja restaurado ou seja atingido o limite

operativo das linhas, equipamentos da rede ou capacidade dos GDs. Ao final do procedimento de construção uma configuração radial é proposta.

Note que ao longo da fase de construção apenas o número de consumidores foi considerado (objetivo *a*), uma vez que não é possível avaliar o número de chaveamentos durante a construção de uma configuração de rede (objetivo *b*). Este será considerado na etapa seguinte.

3.2 Procedimento de busca local

Festa e Resende (2009a) apresentam uma vasta bibliografia sobre a meta-heurística GRASP abordando os mais diversos problemas de otimização: atribuição de tarefas, roteamento, lógica, particionamento, alocação, problemas grafo-orientados, transporte, biologia, entre outros.

Para cada problema de otimização é apresentado uma fase de busca local adaptada, por exemplo, em um simples problema do caixeiro viajante (Marinakis; Migdalas; Pardalos, 2005) pode-se utilizar a estratégia de 2-opt ou 3-opt como busca local, enquanto no problema da mochila (Knapsack Problem) pode-se recorrer à técnica de troca simples (1-Exchange) utilizada por Viana e Arroyo (2004). Este exemplo ilustra que, assim como a filosofia de construção de um GRASP, o procedimento de busca local não se restringe a um modelo pré-determinado, e deve ser adotada uma metodologia que melhor se adapte ao problema em questão.

O procedimento de busca local, quando destinado à solução do problema de restauração de redes de energia elétrica, pode ser caracterizado pela troca do estado (aberto/fechado) entre dois ramos da rede. No entanto, um consenso técnico deve ser considerado: nenhuma chave pode ser aberta de modo a interromper o fornecimento de energia às seções que se mantiveram energizadas após a falta. No exemplo da figura 4, isto aconteceria caso o procedimento de busca local excluísse uma ou mais seções dos alimentadores B ou C para energizar seções pertencentes ao alimentador A que ficaram sem fornecimento após a falta. Note que, considerando a definição de vizinhança adotada, o procedimento de busca local se faz necessário somente se a configuração gerada pela fase de construção não restabelecer a totalidade das seções.

Partindo de uma solução factível *S*, estabelecida durante o procedimento de construção, encontra-se as *v* soluções vizinhas caracterizadas pela troca de estado entre duas chaves. Para cada vizinho é analisado se as restrições do problema são atendidas (restrições *a* a *g*), e então, as melhores soluções (que atendem às restrições) são mantidas, isto é, apenas as *S'* soluções não dominadas com relação às funções objetivo *a* e *b* são armazenadas. O conceito de dominância e não dominância é apresentado por Kalyanmoy Deb (2004). Na figura 5 é ilustrado o procedimento de busca local adotado.

Procedimento de Busca Local	
1	$S' \leftarrow \{\emptyset\}$
1	encontrar as <i>v</i> soluções vizinhas;
2	para <i>i</i> $\leftarrow 0$ até <i>v</i> faça
5	se (viz(<i>i</i>) atende restrições e não dominado) então
6	$S' = S' + \{\text{viz}(i)\};$
7	fim se
10	fim para

Figura 5: Procedimento de busca local adotado.

Ao final do algoritmo, ou seja, após atingir um determinado número de iterações ou tempo de processamento, as *S'* soluções, propostas a cada iteração, são novamente avaliadas, e apenas o conjunto S^* , contendo as soluções não dominadas de todo o processo com relação às funções objetivo *a* e *b*, é apresentado ao operador do sistema.

4. Resultados

O algoritmo GRASP dedicado à solução do problema de restauração de sistemas de distribuição de energia elétrica foi implementado em linguagem C++ e simulado utilizando um microcomputador com processador Intel® Core™2 Duo E4300 e 2 GB de memória RAM.

Os dados de entrada de recursos hídricos foram extraídos de uma base de dados real do rio Ribeirão do Taboão na cidade de Delfim Moreira – MG com medições diárias (ANA, 2005). Para os dados de irradiação solar e velocidade do vento foram utilizados a base de dados de uma estação meteorológica localizada no aeroporto Pinto Martins, Fortaleza – CE, disponibilizada pelo programa SWERA (SWERA, 2003) com medições horárias. O carregamento dos transformadores de distribuição foi obtido atribuindo a curva de carga da subestação de maneira proporcional a cada transformador.

Uma subestação real contendo nove alimentadores foi utilizada como teste. O alimentador 1 foi o escolhido e uma falta simulada em sua seção 4 com saída às 9 hrs e retorno às 13 hrs. Este alimentador possui 42 seções, 46 chaves de manobras e 1650 consumidores. Na seção 22 foi alocado uma micro central hidrelétrica de 125 kW. Na seção 39, cinco turbinas, como as descritas na tabela 2, formam um parque eólico com potência nominal de 500 kW. Por fim, na seção 42, foi alocada uma central solar formada por 200 células fotovoltaicas de 210 W, totalizando 42 kW instalados. Na figura 6 é ilustrada a topologia do alimentador testado.

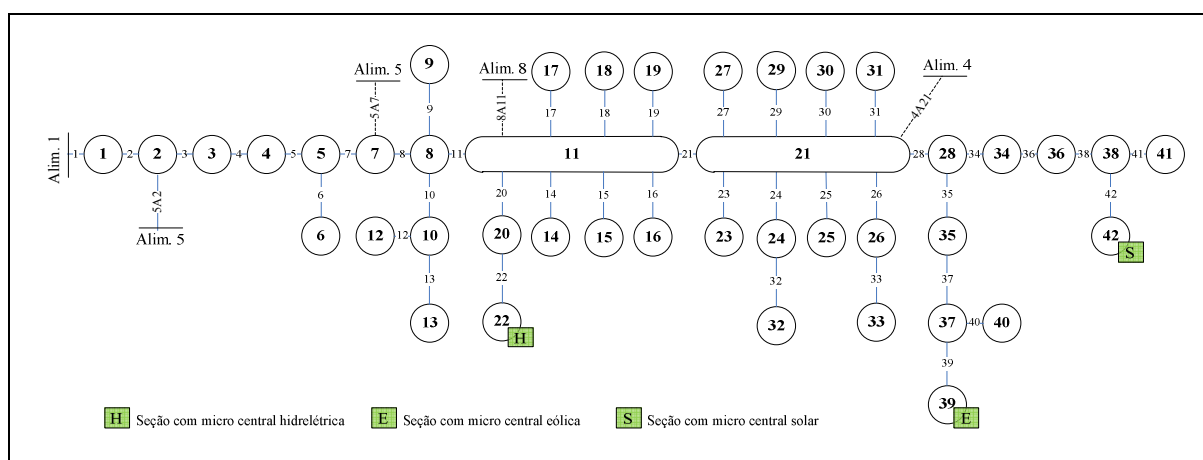


Figura 6: Topologia do alimentador testado.

Assumindo o critério de parada igual a 60 segundos, tempo de processamento considerado adequado para o problema, o algoritmo descrito nas seções anteriores retornou um conjunto de propostas factíveis. Na figura 7 são ilustrados os valores de ambas as funções objetivos para cada uma destas soluções em função dos alimentadores envolvidos na restauração.

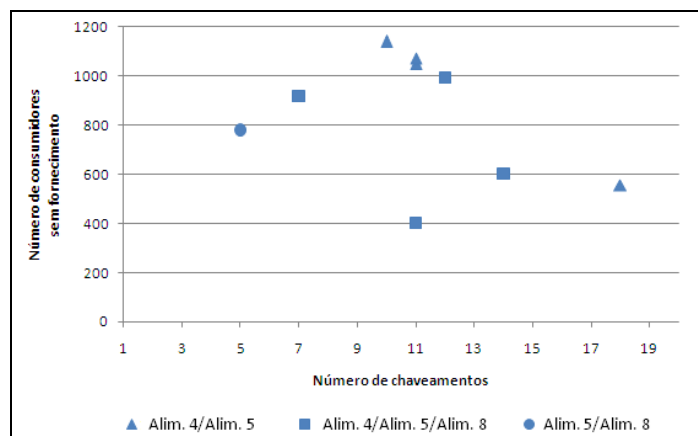


Figura 7: Valores das funções objetivos para cada solução proposta.

A partir da figura anterior pode-se observar que o alimentador 4 em conjunto com o alimentador 5 não trazem boas soluções, resultado de baixa disponibilidade destes alimentadores. A disponibilidade, neste caso, pode ser interpretada pelas restrições *a*, *b*, *d* e *e*, restrições estas que são eliminadas durante o procedimento de construção (testes 1, 2 ou 3).

A fronteira de Pareto, para uma simulação de falta na seção 4, é composta de apenas duas soluções, uma totalizando 5 chaveamentos, mantendo 780 consumidores sem fornecimento após a restauração e envolvendo os alimentadores 5 e 8, e outra contabilizando 11 chaveamentos porém mantendo apenas 403 consumidores sem fornecimento, envolvendo todos os alimentadores disponíveis. Estas duas soluções estão ilustradas na tabela 3.

Tabela 3: Propostas de soluções não dominadas para uma falta na seção 4.

Proposta 1						
Consum. sem fornec.: 780		Núm. de chaveamentos: 5		Fechar chaves: 8A11; 5A7		
Abrir chaves:		8; 34;37				
Carregamento horário dos transformadores (MVA)						
Código	Potência máxima ¹	9 hrs	10 hrs	11 hrs	12 hrs	13 hrs
Trafo 1	33,3	30,57	32,49	32,47	30,84	28,94
Trafo 2	33,3	27,76	29,53	29,51	28,02	26,28
Carregamento horário dos alimentadores (A)						
Código	Corrente máxima ²	9 hrs	10 hrs	11 hrs	12 hrs	13 hrs
Alim. 5	555	375,81	400,53	400,18	379,69	355,31
Alim. 8	555	395,66	423,46	423,07	399,76	372,60
Proposta 2						
Consum. sem fornec.: 403		Núm. de chaveamentos: 11		Fechar chaves: 8A11; 5A7; 4A21		
Abrir chaves:		8; 21; 25; 26; 29; 32; 41; 42				
Carregamento horário dos transformadores (MVA)						
Código	Potência máxima ¹	9 hrs	10 hrs	11 hrs	12 hrs	13 hrs
Trafo 1	33,3	31,30	33,28	33,25	31,59	29,64
Trafo 2	33,3	26,60	28,28	28,26	26,83	25,17
Carregamento horário dos alimentadores (A)						
Código	Corrente máxima ²	9 hrs	10 hrs	11 hrs	12 hrs	13 hrs
Alim. 4	410	312,01	331,78	331,49	314,38	295,29
Alim. 5	555	375,81	400,53	400,18	379,69	355,31
Alim. 8	555	341,39	365,11	364,77	344,76	321,61

¹ O valor de “potência máxima” corresponde o valor da máxima potência ventilada do transformador da subestação.

² O valor de “corrente máxima” compreende o menor valor entre capacidade dos condutores e equipamentos na saída da subestação.

Através da tabela anterior é possível verificar que as restrições *a* e *b* não são violadas. Em conjunto com figura 6, observa-se que a central eólica opera de forma ilhada pela proposta 1, porém atende as restrições *d*, *e* e *f* do problema. Na figura 8 é ilustrado potencial de geração da central eólica (P^{MAX}), a potência consumida e o fator de potência da carga do bloco isolado.

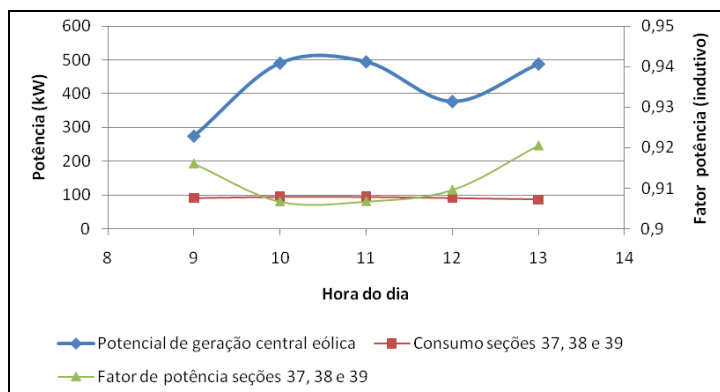


Figura 8: Potencial de geração, consumo e fator de potência do bloco isolado (Proposta 1).

O operador do COD, com base em sua experiência, deve selecionar uma das soluções da fronteira de Pareto que seja econômica e tecnicamente viável e efetuar e/ou coordenar as manobras em campo. Para auxiliá-lo nesta difícil tarefa de escolher uma única solução, métodos multicritérios baseados na experiência coletiva dos operadores podem ser implementados.

5. Conclusões

Este trabalho apresenta uma técnica de otimização combinatória multiobjetivo para a solução do problema de restauração de redes de distribuição multiobjetivo considerando geradores distribuídos. Os resultados mostram que a técnica se ajusta bem ao problema e consegue, em um tempo considerado adequado, soluções de boa qualidade, isto é, soluções factíveis do ponto de vista matemático (atende as restrições de a a g) e do ponto de vista operacional (pequeno número de chaves manobradas).

As próximas etapas da pesquisa serão norteadas por estudos destinados à previsão de carga e de recursos durante pequenos intervalos de tempo (algumas horas) e o comportamento transitório de tensão e corrente durante os chaveamentos. Desta forma espera-se contemplar os principais aspectos do problema de restauração de redes de distribuição.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq (proc. 302272/2009-7) e a FAPESP (proc. 2009/01682-2) pelo apoio financeiro a este projeto de pesquisa.

7. Referências Bibliográficas

- ANA (Agência Nacional de Águas). **HidroWeb – Sistemas de Informações Hidrológicas**. 2005. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acesso em: 17 mai. 2010.
- CHIRADEJA, P., RAMAKUMAR, R. **An approach to quantify the technical benefits of distributed generation**, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 19, n. 4, p. 764- 773, dez. 2004.
- DEB, K. **Multi-objective optimization using evolutionary algorithms**. 1 ed. Chichester. John Wiley & Sons Ltd, 2004.
- DUGAN, R.C.; MCDERMOTT, T.E. **Distributed generation**, IEEE *Industry Applications Magazine*, v. 8, n. 2, p. 19-25, Mar. Abr. 2002.
- ESHA. **Guide on How to Develop a Small Hydropower Plant**. 2004. Disponível em: <<http://www.eshabe.com/index.php?id=39>>. Acesso em: 30 out. 2009.
- FESTA, P.; RESENDE, M. G. C., An annotated bibliography of GRASP, Part I: Algorithms, International Transactions in Operational Research, v. 16, n. 1, p. 1-24, 2009.
- FESTA, P.; RESENDE, M. G. C., An annotated bibliography of GRASP, Part II: Applications, International Transactions in Operational Research, v. 16, n. 2, p. 131-172, 2009a.
- GOMEZ, J. C., MORCOS, M. M. **Distributed generation: Exploitation of islanding operation advantages**, Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America 2008, p. 1-5, ago. 2008.
- MCDERMOTT, T.E.; DUGAN, R.C. **PQ, reliability and DG**, IEEE Industry Applications Magazine, v. 9, n. 5, p. 17- 23, Set.-Out. 2003.
- KUNDU, D. **An Overview of the Distributed Generation (DG) Connected to the GRID**, Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference 2008 (POWERCON 2008), p. 1-8, out. 2008.
- KUNDUR, P. **Power Systems Control and Stability**. 1 ed. Palo Alto, McGraw-Hill Professional. 1994.
- NORTHERNPOWER. **Northwind 100 Specifications**. Barre. 2009. Disponível em: <<http://www.northernpower.com/pdf/specsheet-northwind100-us.pdf>>. Acesso em: 27 mar. 2010.
- RASHID, M. H. **Power Electronics Handbook**. 2 ed. Burlington, Elsevier Inc. 2007.
- SAMLEX POWER. **SA-150, SA-300 Series Pure Sine Wave Inverter User's Manual**. Coquitlam. 2009. Disponível em: <http://www.samlexamerica.com/customer_support/pdf/Manuals/SA-150_SA-300_Manual_Mar2010.pdf>. Acesso em: 17 mai. 2010.
- SWERA. **Solar: hourly solar (direct normal (DNI), global horizontal (GHI), and diffuse) data for selected stations in Brazil from NREL**. 2003. Disponível em: <<http://swera.unep.net/index.php?id=metainfo&rowid=148&metaid=267>>. Acesso em: 18 mai. 2010.