Alocação de chaves para melhoria da confiabilidade da rede de distribuição de energia elétrica.

Alysson M. Costa[1], Marcus Ritt[1], Luciana Buriol[1] e Vinícius J. Garcia[2]

[1] *Instituto de Informática - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS*

[2] *Universidade Federal do Pampa - UNIPAMPA/UFSM*

{amcosta, mrpritt, buriol}@inf.ufrgs.br, garcia@inf.ufsm.br

Resumo

Este artigo estuda o problema de alocação de chaves em sistemas elétricos de distribuição, com o intuito de aumentar-se a confiabilidade da rede. O interesse deste trabalho decorre do fato de que falhas no sistemas de distribuição respondem por 80% das interrupções e do fato que a instalação de chaves é uma maneira eficaz de diminuir o número de consumidores afetados por tais falhas. Neste trabalho, é proposta uma metodologia para avaliação da confiabilidade de uma rede dado um conjunto de chaves instaladas e dois métodos heurísticos para determinação de posições adequadas para instalação de tais chaves.

Palavras-chave: Confiabilidade, chaves, redes elétricas.

Abstract

This article studies the problem of allocating switches on distribution system electrical networks, with the goal of increasing the overall network reliability. The interest on this comes from the fact that 80% of the service interruptions in electrical networks are due to failures in the distribution systems and from the fact that the installation of switches can efficiently reduce the number of consumers affected by a given failure. We propose a new methodology for evaluating the reliability given by a set of installed switches, which is used in two heuristic methods presented for the definition of the best switches positions.

Keywords: Reliability, switches, electrical networks.

1 Introdução

Com as sucessivas reestruturações do setor elétrico brasileiro e a criação da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), ganharam importância os quesitos de confiabilidade e eficiência na prestação de serviços. Tal importância é refletida nos investimentos em pesquisa e desenvolvimento no setor e na regulamentação e fiscalização dos índices de qualidade das prestadoras.

Neste contexto, a questão da confiabilidade é vista com atenção especial. As companhias devem se adequar aos critérios impostos pela ANEEL, tendo interesse em fazê-lo da forma que implique os menores custos possíveis. Estes dois critérios antagônicos (qualidade e custo) podem dar origem a diversos problemas de otimização, segundo a estratégia utilizada para aumentar a confiabilidade do sistema.

Considerando o sistema elétrico de maneira global e analisando-se os processos de geração, transmissão e distribuição, pode-se concluir que uma das maneiras mais eficazes de obter ganhos em confiabilidade é através de investimentos no sistema de distribuição. O interesse neste sistema vem sobretudo do fato de grande parte dos problemas de falta de fornecimento ocorrerem devido a falhas aí localizadas. Efetivamente, Teng and Lu (2002) atribuem 80% das interrupções no fornecimento de energia a problemas na distribuição.

A rede de distribuição é a parte do sistema entre a transmissão e o consumidor final, e é composta pelas subestações rebaixadoras que são conectadas aos consumidores através de alimentadores. Estes alimentadores podem ser de dois tipos: alimentadores principais, que formam um sistema radial e alimentadores de suporte, desconectados eletricamente do sistema.

Ganhos de confiabilidade podem ser obtidos sobretudo através do fortalecimento topológico do sistema de distribuição. Por fortalecimento topológico, entende-se a instalação de chaves automáticas nos alimentadores principais e/ou de suporte. Tais chaves permitem uma rápida reconfiguração do sistema em caso de contingências. Desta maneira, podem-se isolar áreas problemáticas, impedindo-se a propagação das falhas (abrindo-se, para tal, chaves localizadas nos alimentadores principais), ou reconectar áreas que por ventura venham a tornar-se ilhadas (fechando-se chaves localizadas nos alimentadores de suporte).

Devido ao custo associado à instalação de chaves e a limites orçamentários, nem todos os alimentadores podem receber chaves. Estabelece-se então um problema de otimização com natureza multi-objetivo onde por um lado deseja-se minimizar o custo de instalação das chaves e por outro maximizar a eficiência destas no aumento da confiabilidade da rede. Este problema é altamente combinatório, i.e., a quantidade de possibilidades de solução cresce exponencialmente com o tamanho do sistema. A enumeração de tais soluções (e a conseqüente escolha da melhor entre elas) torna-se inviável já para sistemas de médio porte. Os autores desconhecem a existência de métodos exatos mais elaborados.

A impossibilidade de obter-se soluções exatas não impede que métodos heurísticos possam ser utilizados para o projeto de soluções factíveis que, embora não sejam garantidamente ótimas, podem proporcionar ganhos consideráveis se comparadas com soluções obtidas através de métodos manuais. De fato, Carvalho et al. (2005) propõem um método baseado na decomposição da rede em trechos independentes e a subseqüente resolução do problema de alocação de chaves nestes trechos. Os autores consideram os tempos de restauração de serviço para calcular uma medida da confiabilidade mas não

mencionam como tais tempos são obtidos.

Billinton and Jonnavithula (1996) propõem um objetivo ponderado entre o custo de instalação de chaves e o custo da energia não suprida em caso de falha. Para resolver o problema, os autores usam um algoritmo de *simulated annealing*. O cálculo da confiabilidade é feito usando-se os tempos de interrupção e um algoritmo de busca em profundidade, mas nenhum detalhe extra é fornecido.

Celli and Pilo (1999) apresentam um algoritmo exato baseado no princípio de optimalidade de Bellman. Isso só é possível, entretanto, porque os autores consideram apenas a instalação de chaves em alimentadores principais. Dessa maneira, cada sub-árvore pode ser tratada de maneira independente. Além disso, por considerar o caso onde os dois objetivos (minimização do custo de instalação e maximização da confiabilidade) são ponderados, os autores são capazes de eliminar diversos alimentadores onde o ganho em confiabilidade seria ultrapassado pelo custo de instalação. Estas duas simplificações ajudam a controlar a dita 'maldição da dimensionalidade' (Bellman, 1961), e permitem a resolução exata do problema. Outro tipo de simplificação é feito por Teng and Lu (2002), que consideram apenas a realocação espacial das chaves em um mesmo alimentador e resolvem este problema em duas fases. Em uma primeira etapa, os autores encontram a direção de busca e em um segundo momento, analisam o ganho de se transferir a chave para o alimentador vizinho.

Neste artigo, busca-se uma maneira eficiente e transparente de cálculo da confiabilidade obtida por um dado conjunto de chaves. Para isso, na seção seguinte, detalha-se o sistema de distribuição e o problema tratado. Em seguida, na Seção 3, apresenta-se o método de cálculo da confiabilidade proposto. Tal método é utilizado para o desenvolvimento de um algoritmo construtivo e de um algoritmo de busca tabu, ambos apresentados na Seção 4. Os resultados obtidos por tais algoritmos são mostrados e analisados na Seção 5. O artigo é encerrado com uma seção de conclusões e trabalhos futuros.

2 O sistema de distribuição e o problema de alocação de chaves

O sistema de distribuição compreende a parte do sistema elétrico que liga o sistema de transmissão ao consumidor final. Este sistema se inicia nas subestações rebaixadoras e vai até as entradas elétricas dos consumidores finais.

A Figura 1 apresenta de maneira esquemática o sistema de distribuição.

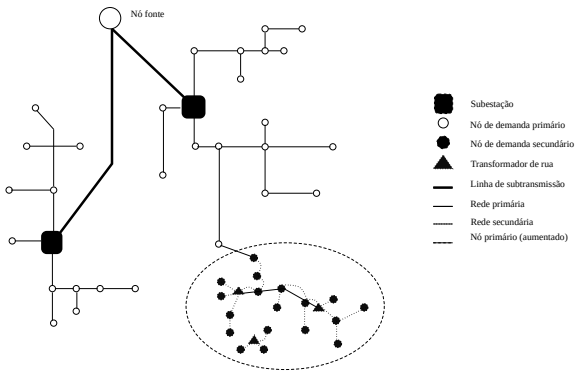


Figura 1: Sistema de distribuição

A energia provém do sistema de geração através das linhas de subtransmissão e chega às subestações onde a tensão é rebaixada. A energia é então levada aos centros de consumo (e.g., bairros de uma cidade) através da rede primária. Em cada centro de consumo, a tensão é rebaixada através dos transformadores de rua e levada até o consumidor final através de redes de baixa tensão (rede secundária).

Este trabalho se concentra na rede primária, aquela que vai das subestações até os centro de consumo. Note que esta rede é um conjunto de redes radiais (árvores), cujos nós raiz são as subestações e os nós folhas são os centros de consumo. Considerando apenas esta parte do sistema elétrico, tem-se a Figura 2. Nesta figura, além da rede radial, são apresentados possíveis alimentadores de suporte (não conectados eletricamente) entre alguns nós. Nesta figura, os arcos são etiquetados para futura referência.

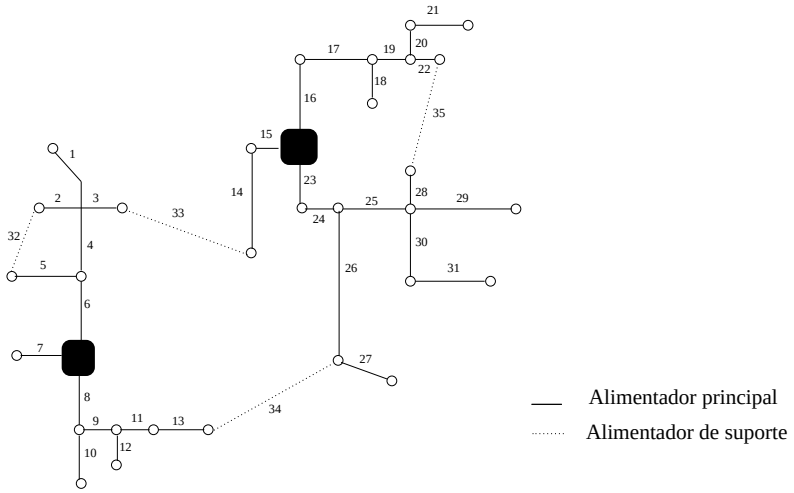


Figura 2: Rede primária - alimentadores principais e de suporte

O problema de alocação de chaves consiste na seleção de alguns alimentadores (principais ou de suporte) para instalação de dispositivos que podem abrir ou fechar uma conexão elétrica. Dessa maneira, dada uma certa situação de falha, podem-se utilizar chaves instaladas nos alimentadores principais para isolar a falha e impedir a sua propagação, diminuindo-se o número de consumidores afetados. Além disso, podem-se utilizar chaves em alimentadores normalmente abertos para servir consumidores que ficaram isolados.

Considere-se novamente a Figura 2 e tome-se, por exemplo, o caso de uma falha no alimentador 17. Sem nenhum mecanismo de proteção, essa falha se espalharia e interromperia o serviço a todos os consumidores da sub-árvore que se inicia no alimentador 16. Imagine, entretanto, o caso em que são instaladas chaves nos alimentadores principais 16 e 19 e no alimentador de suporte 35. A mesma falha no alimentador 17 poderia ser isolada através da abertura das chaves em 16 e 19. A abertura da chave no alimentador 16 interrompe o fornecimento a toda sub-árvore, mas, através do fechamento da chave no alimentador 35, ao menos uma parte dos consumidores (aqueles que não se encontram entre os alimentadores 16 e 19) podem ser servidos, reduzindo-se assim, através da operação das chaves, o prejuízo causado pela falha.

Ao contrário do exemplo anterior, onde se considera uma falha específica, ao se resolver o problema

da alocação de chaves, há de se considerar todas as falhas possíveis (possivelmente ponderadas pela probabilidade de falha). O problema torna-se, portanto, instalar as chaves de uma maneira tal que a média de carga servida, para todas as falhas possíveis, seja a maior possível. Neste trabalho, chama-se esta média de carga servida para todas as falhas possíveis de 'confiabilidade da rede'. Na próxima seção apresenta-se uma maneira de calcular rapidamente a confiabilidade de uma rede para um dado conjunto de chaves instaladas.

3 Avaliação da confiabilidade

Neste trabalho, considera-se que uma falha se propaga até que seja isolada por uma chave aberta. Todas as demandas dos nós alcançados pela propagação da falha são dadas como não servidas (pertencentes à *área escura*). A abertura de chaves cria uma outra categoria de nós: aqueles que não pertencem à área escura (não foram alcançados pelas falhas), mas também não estão conectados à nenhuma subestação. Estes nós são servidos apenas se existe uma chave em um alimentador de suporte que possa ser fechada, conectando-os a alguma área atualmente servida.

Baseado nas duas regras acima, o Algoritmo 1 pode ser usado para calcular a demanda servida, considerando-se uma falha em um dado arco. No algoritmo, a seguinte nomenclatura é utilizada:

- N : Conjunto de nós do grafo: centros de consumo e subestações.
- $N_s \subset N$: conjunto de subestações.
- A_p : Conjunto dos alimentadores principais.
- A_s : Conjunto dos alimentadores de suporte.
- $A_p(v)$: Conjunto dos alimentadores principais incidentes no nó v.
- $A_s(v)$: Conjunto dos alimentadores de suporte incidentes no nó v.
- S : (vetor), $S[i] = 1$ se há uma chave instalada no alimentador $i \in A_p \cup A_s$ e 0 caso contrário.
- $f = \{u_f, v_f\}$: arco com falha, $f \in A_p$, incidente nos nós u_f e v_f.
- $dem(n)$: demanda de um centro de consumo associado a um nó $n \in N \backslash N_s$;
- E_N : Conjunto de nós atingidos diretamente pela falha (área escura).
- E_A : Conjunto de arcos atingidos diretamente pela falha (área escura).
- C : Conjunto de nós servidos após manipulação das chaves (área clara).

O algoritmo recebe como entrada o grafo representando a rede, com todos os nós (subestações e centros de consumo), as chaves instaladas e o arco f com falha, e retorna a porcentagem de nós servidos após manipulação das chaves. Entre as linhas 3 e 14 obtém-se os nós e arcos atingidos diretamente pela falha. Estes são aqueles conectados ao alimentador com falha sem que entre eles exista nenhuma chave seccionadora. Entre as linhas 16 e 26 do algoritmo, calculam-se os nós servidos. Um nó é servido se ele está conectado a uma subestação através de alimentadores principais não atingidos pela falha ou através de alimentadores de suporte que contém chaves (ver linha 19). O cálculo da porcentagem da demanda servida em relação à demanda total é feito na linha 27. Nas duas buscas nas linhas 3–14 e 16-26 cada nó e cada arco é processado no máximo uma vez. Portanto, a complexidade dele é limitada por $O(N + |A_p \cup A_s|)$. A complexidade da avaliação, que é linear no tamanho do grafo, garante a eficiência dos métodos heurísticos que a utilizam.

Algoritmo 1 Avaliação da porcentagem de demanda servida para uma falha em um arco f

ENTRADAS: Grafo $G = (N, A_p \cup A_s)$, S, $f = \{u_f, v_f\}$.
SAÍDAS: % = porcentagem da demanda servida.

1: $E_N = \{u_f, v_f\}, E_A = \{f\}, C = \emptyset$.
2: *// Calcula área escura (linhas 3 a 14):*
3: $Q = E_N$.
4: **enquanto** $|Q| > 0$ **faça**
5: Escolha $u \in Q$.
6: **para** cada arco $a = \{u, v\} \in A_p(u) | S[a] = 0$ **faça**
7: $E_A = E_A \cup \{a\}$
8: **se** $v \notin E_N$ **então**
9: $E_N = E_N \cup \{v\}$.
10: $Q = Q \cup \{v\}$.
11: **fim**
12: **fim**
13: $Q = Q \backslash \{u\}$
14: **fim**
15: *// Calcula área atendida (linhas 16 a 26):*
16: $Q = N_s$
17: **enquanto** $|Q| > 0$ **faça**
18: Escolha $u \in Q$.
19: **para** cada arco $a = \{u, v \notin E_N\} \in A_p(u) \backslash E_A$ ou $a = \{u, v \notin E_n\} \in A_s(u) | S[a] = 1$ **faça**
20: **se** $v \notin C$ e $v \notin N_s$ **então**
21: $C = C \cup \{v\}$.
22: $Q = Q \cup \{v\}$.
23: **fim**
24: **fim**
25: $Q = Q \backslash \{u\}$
26: **fim**
27: % = $\frac{\sum_{v \in C} dem(v)}{\sum_{v \in N \backslash N_s} dem(v)}$.

Para o cálculo da confiabilidade, basta efetuar a média das demandas servidas para cada falha. Caso a probabilidade de falha de cada arco seja conhecida, pode-se fazer uso desta informação e obter uma melhor estimativa da confiabilidade através de uma média ponderada.

4 Algoritmos de otimização

Dada uma maneira de calcular a confiabilidade para um dado conjunto de arcos instalados, podem-se propor algoritmos de otimização cujo intuito seja maximizar a confiabilidade obtida com um certo número de chaves. Nesta seção são propostas duas abordagens. Primeiro, apresenta-se um algoritmo construtivo e em seguida, um método baseado em busca tabu.

4.1 Algoritmo construtivo

Considerando-se que se deseja instalar k chaves, uma abordagem simples é considerar a instalação de uma chave por vez, maximizando o ganho incremental a cada chave instalada. Uma vez que uma

chave seja alocada, a sua posição permanece fixa até o fim do método.

O Algoritmo 2 apresenta esta abordagem construtiva.

Algoritmo 2 Abordagem construtiva

ENTRADAS: Grafo $G = (N, A_p \cup A_s)$, k

SAÍDAS: S

1: $S[i] = 0, \ \forall i \in A_p \cup A_s$
2: **para** i=1 até k **faça**
3: Determine a posição p que apresenta o maior ganho em confiabilidade ao se instalar uma chave.
4: $S[p] = 1$.
5: **fim**

A complexidade deste algoritmo depende, além das dimensões do grafo, do número k de chaves a instalar. Para cada chave i, sendo $1 \leq i \leq k$, avalia-se a solução para as $(|A_p \cup A_s| - i)$ posições disponíveis para instalação de chaves. Como o Algoritmo 1 é usado para avaliar cada solução, então a complexidade do Algoritmo 2 é igual a $O(k \cdot |A_p \cup A_s| \cdot (N + |A_p \cup A_s|))$, sendo $(N + |A_p \cup A_s|)$ a complexidade do Algoritmo 1.

4.2 Algoritmo de busca tabu

Além da abordagem construtiva, propõe-se também um algoritmo baseado em busca tabu (Glover, 1989a,b; Glover and Laguna, 1997). A busca tabu baseia-se na definição de uma solução inicial e de uma vizinhança. O método evolui através da visitação sucessiva do melhor elemento vizinho da solução corrente. Para evitar o aprisionamento em mínimos locais, soluções de valor inferior à solução atual são aceitos. Ao mesmo tempo, com o intuito de evitar ciclagem, estabelece-se uma duração tabu, durante a qual um movimento efetuado não pode ser desfeito.

Algoritmo 3 Busca Tabu

ENTRADAS: Grafo $G = (N, A_p \cup A_s)$, S_0.

SAÍDAS: S.

1: $bestS = S = S_0$.
2: **enquanto** Critério de Parada não atingido **faça**
3: $S_t = S_n$
4: **enquanto** $|N(S)| > 0$ **faça**
5: Escolha $S_c \in N(S)$.
6: **se** $v(S_c) > v(bestS)$ **então**
7: $bestS = S = S_c$.
8: break;
9: **senão**
10: **se** $v(S_c) > v(S_t)$ e Lista tabu respeitada **então**
11: $S_t = S_c$.
12: **fim**
13: **fim**
14: $S = S_t$.
15: **fim**
16: Atualiza lista tabu.
17: **fim**

Como anteriormente, codifica-se uma solução do problema como um vetor S com $|A_p \cup A_s|$ elementos, cada um associado a um alimentador na rede original. O elemento i deste vetor só é igual a 1 caso uma chave esteja sendo instalada no alimentador associado.

Dada uma solução S_0, definimos um vizinho desta solução como sendo um vetor S_v que contém todos os elementos iguais a S_0 com exceção de dois: j e k. Enquanto na solução atual S_0, $S_0[j] = 0$ e $S_0[k] = 1$, na solução vizinha $S_v[j] = 1$ e $S_v[k] = 0$.

O algoritmo parte de uma solução inicial qualquer, por exemplo, obtida através da alocação das chaves em posições aleatórias ou através do algoritmo construtivo descrito na seção anterior. A cada iteração, o valor da confiabilidade de cada solução vizinha é calculado. Durante este processo, caso uma solução de confiabilidade maior que a melhor solução atual seja encontrada, o algoritmo assume esta solução como nova solução atual. O alimentador que na iteração anterior recebia uma chave e na iteração atual passa a não receber é adicionado à lista tabu, indicando que ele deve permanecer sem chave por um número determinado de iterações (10, nos testes efetuados). Caso nenhuma solução seja melhor que a solução atual, o algoritmo substitui a solução atual pela melhor solução vizinha que não viola nenhuma restrição de tabu. O Algoritmo 3 apresenta o procedimento, onde para um vetor S representando uma solução, $v(S)$ é o valor da confiabilidade oferecida por esta solução e $N(S)$ é o conjunto de soluções vizinhas a S. Assuma também que S_n é a pior solução possível, oferecendo uma confiabilidade 0.

O algoritmo começa com uma solução inicial e percorre as soluções da vizinhança. Se uma solução de maior confiabilidade é encontrada (linha 6), o algoritmo atualiza a melhor solução e a solução atual (linha 7) e sai do loop das linhas 4-15. Caso contrário, o algoritmo percorre toda a vizinhança em busca da solução que menos degrada a solução atual e respeita a lista tabu (linhas 9-12). Na linha 16 a lista tabu é atualizada. Finalmente, como critério de parada utiliza-se o término de 100 iterações.

5 Resultados

O método de avaliação da confiabilidade e os dois algoritmos propostos foram testados em instâncias adaptadas de duas redes reais (Garcia, 2005). As instâncias se dividem em uniformes, onde cada centro de consumo tem a mesma demanda nominal (o que representa bem novos lotes residenciais) e aleatórias onde cada centro de consumo tem uma demanda diferente, obtida a partir de dados de redes reais já em funcionamento. Considera-se uma probabilidade de falha igual para cada alimentador. A Tabela 1 apresenta detalhes de cada instância. Para as instâncias, consideram-se situações com o número de chaves variando entre 1 e 20. As medidas foram obtidas em uma máquina com processador Pentium 4 de 2.53 GHz e com 512 MB de memória. Todos algoritmos foram implementados em C++ e compilados com GNU gcc 4.0.2 com otimização máxima (-O3).

Os seguintes resultados para as instâncias R1U e R1A são apresentados na Tabela 2. Na Tabela, são apresentados a confiabilidade obtida pelo algoritmo construtivo e pela busca tabu para um dado número de chaves. Nota-se que o algoritmo tabu consegue uma ligeira melhoria nos resultados obtidos pelo construtivo. Como medida de comparação da eficiência do método tabu utilizamos também, na ausência de métodos exatos, soluções ótimas por enumeração para as instâncias R1A e

Instância	Número de nós		Número de alimentadores		Tipo
	subestações	consumo	principais	suporte	demanda
R1U	1	33	33	7	uniforme
R1A	1	33	33	7	aleatória
R2U	5	88	92	17	uniforme
R2A	5	88	92	17	aleatória

Tabela 1: Descrição das instâncias

R1U, considerando-se entre 1 e 7 chaves instaladas. A comparação mostra que os resultados obtidos pelo algoritmo tabu são sempre ótimos (e, ao mesmo tempo, que os resultados obtidos pelo algoritmo construtivo estão muito próximos da optimalidade). Nas Tabelas 2 e 3, os tempos são o de uma simulação padrão, já que há muito pouca variação para duas simulações diferentes.

Inst.	# Ch.	Const.	t(s)	Tabu	t(s)
R1U	5	51.89%	0.02	**61.17%**	1.56
	10	72.25%	0.03	**75.38%**	2.97
	15	79.26%	0.05	**81.25%**	3.76
	20	81.82%	0.06	**82.86%**	4.21
R1A	5	62.60%	0.01	**62.82%**	1.61
	10	74.08%	0.03	**76.94%**	3.00
	15	79.71%	0.05	**81.79%**	3.98
	20	82.14%	0.06	**83.56%**	3.92

Tabela 2: Resultados - instância R1U e R1A

Inst.	# Ch.	Const.	t(s)	Tabu	t(s)
R2U	5	87.61%	0.45	**88.10%**	43.28
	10	90.91%	0.88	**91.45%**	80.02
	15	93.42%	1.29	**93.47%**	119.67
	20	94.43%	1.68	**94.61%**	151.22
R2A	5	87.62%	0.45	**88.56%**	43.73
	10	91.04%	0.90	**91.47%**	82.12
	15	93.04%	1.31	**93.48%**	105.43
	20	94.25%	1.78	**94.58%**	139.35

Tabela 3: Resultados - instância R2U e R2A

Na Tabela 3 apresentam-se os resultados para as instâncias R2U e R2A. Novamente, percebe-se um ligeiro ganho obtido com a busca tabu.

É interessante notar que a diferença obtida em confiabilidade parece crescer mais rapidamente quando o número de chaves é pequeno. De fato, à medida que o número de chaves aumenta, o ganho incremental em confiabilidade obtido com a adição de uma chave adicional diminui significantemente. A Figura 3 demonstra este comportamento para a instância R2U, obtida com o algoritmo tabu. É interessante notar que tal curva pode ser usada pelos tomadores de decisão para decidir não somente onde, mas quantas chaves devem-se instalar.

Um último comentário diz respeito à velocidade da busca tabu considerando-se as soluções iniciais. Quando inicializado com uma solução aleatória, a busca tabu realiza o número de iterações mais rapidamente que quando inicializado com uma solução de boa qualidade proveniente do algoritmo construtivo. Tal fato se dá pois, no primeiro caso, as primeiras iterações são rapidamente interrompidas pelo fato do algoritmo ter encontrado uma melhor solução global. Entretanto, deve-se destacar que, partindo-se da solução de boa qualidade, o algoritmo tabu encontrou a solução final em cerca de 20% do tempo necessário para tal quando partindo de uma solução aleatória.

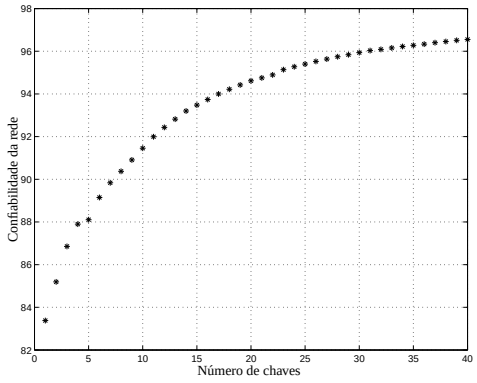


Figura 3: Confiabilidade x Número de chaves (Instância R2U)

6 Conclusões e trabalhos futuros

O aumento da confiabilidade das redes de energia elétrica é um objetivo que vêm sendo valorizado recentemente, devido sobretudo ao maior rigor dos órgãos regulamentadores. A rede de distribuição parece ser o sistema de excelência para aumento da confiabilidade por ser, originalmente, o mais vulnerável a apresentar falhas que resultem em consumidores não atendidos.

A instalação de chaves nos sistemas de distribuição é, atualmente, a maneira mais simples e eficaz de aumento da confiabilidade. Chaves são responsáveis pelo isolamento das falhas e também pela reconexão de consumidores ilhados. Devido ao alto custo de tais mecanismos, entretanto, é necessário racionalizar o número de chaves instaladas e maximizar a sua eficiência. Para isso, precisa-se de um método de avaliação da confiabilidade oferecida por um conjunto de chaves. Neste trabalho, um método simples para tal avaliação é proposto e utilizado em dois algoritmos de otimização desenvolvidos para a decisão dos alimentadores que devem receber chaves seccionadoras.

O método de avaliação proposto contém uma característica que o torna atrativo a otimizadores da rede: a rapidez. Para obter tal eficiência, algumas características da rede elétrica foram ignoradas, como as quedas de tensão nas linhas e as capacidades dos alimentadores. Apesar de crer-se que a inclusão de tais restrições não deva alterar drasticamente os resultados do método proposto, trabalhos futuros devem tratar de incluir e testar tais restrições.

Em novas pesquisas, pretende-se também estudar o comportamento do algoritmo para instâncias maiores e/ou com chaves já pré-instaladas. Nessa última situação, deseja-se considerar o caso em que as chaves já instaladas podem ser movidas (mediante o pagamento de uma penalidade) e o caso em que as chaves já instaladas são fixas.

Um último comentário relevante é o fato da quantidade de chaves a serem instaladas ser igualmente um parâmetro de otimização. Outros trabalhos consideram uma ponderação dos ganhos de confiabilidade e dos custos das chaves na função objetivo. Aqui, considerou-se tal abordagem limitante e preferiu-se fixar o número de chaves com o intuito de obter-se curvas de pareto como a apresentada na Figura 3. De posse de tal curva, o decisor pode facilmente pesar os benefícios e os custos de uma certa solução. Entretanto, para instâncias maiores, pode ser computacionalmente proibitiva a resolução do mesmo problema repetidas vezes. A solução seria então uma abordagem multi-objetivo, que forne-

cesse curvas como a apresentada em uma única simulação. Tal tópico é igualmente interessante para pesquisas futuras.

Referências

Bellman, R. (1961). *Adaptative Control Processes: A Guided Tour*, Princeton University Press.

Billinton, R. and Jonnavithula, S. (1996). Optimal switching device placement in radial distribution systems, *IEEE Transactions on Power Delivery* **11**(3): 1646–1651.

Carvalho, P. M. S., Ferreira, L. A. F. M. and da Silva, A. J. C. (2005). A decomposition approach to optimal remote controlled switch allocation in distribution systems, *IEEE Transactions on Power Delivery* **20**(2): 1031–1036.

Celli, G. and Pilo, F. (1999). Optimal sectionalizing switches allocation in distribution networks, *IEEE Transactions on Power Delivery* **14**: 1167–1172.

Garcia, V. J. (2005). *Metaheurísticas multiobjetivo para o problema de restauração do serviço em redes de distribuição de energia elétrica*, tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP, Campinas, São Paulo, Brasil.

Glover, F. (1989a). Tabu search - part i, *ORSA Journal on Computing* **1**(3): 190–206.

Glover, F. (1989b). Tabu search - part ii, *ORSA Journal on Computing* **2**(1): 4–32.

Glover, F. and Laguna, M. (1997). *Tabu Search*, Kluwer Academic Publications.

Teng, J. and Lu, C. (2002). Feeder-switch relocation for customer interruption cost minimization, *IEEE Transactions on Power Delivery* **17**(1): 254–259.