Melhoria da confiabilidade da rede de distribuição de energia elétrica

Alysson M. Costa[1], Vinícius J. Garcia[2], Paulo M. França[3], Marcus Ritt[4] e Luciana S. Buriol[4]

[1] *Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação - Universidade de São Paulo - USP*
[2] *Universidade Federal do Pampa - UNIPAMPA*
[3] *Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - UNESP*
[4] *Instituto de Informática - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS*
alysson@icmc.usp.br, viniciusgarcia@unipampa.edu.br, paulo.morelato@fct.unesp.br, {mrpritt, buriol}@inf.ufrgs.br

Resumo
O aumento da confiabilidade em redes - sejam elas de telecomunicações, logísticas ou de energia elétrica - passa pela criação de redundância nos caminhos ligando os nós fontes aos nós de demanda. No caso particular do sistema de distribuição de energia, que opera de forma radial, tais caminhos alternativos devem ser mantidos desconectados do sistema principal, o que é feito através de chaves seccionadoras. Em uma dada situação de contingência (falha), um problema operacional NP-difícil é aquele de se determinar as chaves a serem abertas ou fechadas de modo a isolar-se o defeito e reconectar-se a maior parte possível da carga (demanda) do sistema. O objetivo deste trabalho é propor e testar um limitante inferior para uma medida da confiabilidade oferecida por um conjunto de chaves seccionadoras, levando-se em consideração restrições elétricas e de conectividade. Isto é feito através de aproximações adequadas do problema operacional mencionado acima.
Palavras-chave: Confiabilidade, chaves, redes elétricas.

Abstract
The reliability of (telecommunications, logistics, electrical) networks can be increased by the insertion of path redundancy between source and destination nodes. In electrical networks, such redundant paths must be maintained disconnected from the main system by means of electrical switches, since electrical networks operate with a radial topology. When a failure occurs, an operational-time NP-hard problem is to choose which switches should be open or closed in order to isolate the failure and reconnect as much demand nodes as possible. The goal of this work is to propose and test an lower bound for a reliability measure offered by a set of switches, taking into account both connectivity and electrical restrictions. This is done by means of the use of appropriate approximations for the operational-time problem described above.
Keywords: Reliability, switches, electrical networks.

1 Introdução

O interesse em aprimorar o serviço de distribuição de energia elétrica tem relação com as políticas regulatórias do setor determinadas pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). Neste sentido, aspectos como confiabilidade e eficiência são primordiais nas iniciativas de pesquisa e desenvolvimento.

A necessidade de adequação, por parte das companhias, aos indicadores definidos pela ANEEL torna a confiabilidade um fator de especial importância. Entretanto, a melhoria da confiabilidade dos sistemas de energia elétrica pode apresentar um custo elevado, o que determina o interesse em limitá-la tanto quanto possível. Estes dois critérios antagônicos (melhoria da confiabilidade e redução de custos) dão origem a diversos problemas de otimização, definidos como modelos multiobjetivos de modo a incorporar a interdependência dos diferentes aspectos.

A destinação de investimentos para melhoria da confiabilidade dos sistemas de distribuição de energia elétrica encontra justificativa em dados que relacionam as causas de 80% das interrupções no fornecimento às contingências que ocorrem no setor de distribuição (Teng and Lu, 2002).

Uma das estratégias difundidas para aumento da confiabilidade de um sistema de distribuição de energia elétrica se refere à criação de redundâncias nos caminhos ligando os nós fontes aos nós de demanda, ou seja, investir em um fortalecimento topológico. A instalação de chaves automáticas nos alimentadores principais e/ou de suporte permite uma reconfiguração em situações de contingências, possibilitando melhor isolamento do defeito e reduzindo a porção da rede que sofrerá interrupção no fornecimento. A limitação dos investimentos não permite que todos os alimentadores sejam contemplados com a instalação de chaves automáticas, advindo daí a natureza multiobjetivo do problema: busca-se minimizar o custo de instalação das chaves e, ao mesmo tempo, maximizar a confiabilidade da rede.

A consideração do problema de alocação de chaves segundo uma ponderação entre o custo de instalação e o custo associado à energia não suprida (confiabilidade) foi proposta por Billinton and Jonnavithula (1996). Eles usam a metaheurística *Simulated Annealing* como técnica para resolver o problema, apenas mencionando a utilização de um algoritmo de busca em profundidade e o cálculo da confiabilidade com o uso dos tempos de interrupção.

Celli and Pilo (1999) apresentam um algoritmo exato que se baseia no princípio da optimalidade de Bellman. A viabilidade da proposta é assegurada pela decisão de instalar chaves somente em alimentadores principais, o que permite que cada sub-árvore possa ser tratada de forma independente. Adicionalmente, dois objetivos são incluídos no problema: a minimização do custo de instalação e a maximização da confiabilidade. Os autores lembram que a eliminação de soluções é possível sempre que o ganho em confiabilidade é ultrapassado pelo custo de instalação das chaves. Com estas duas simplificações, a maldição da dimensionalidade (Bellman, 1961) é controlada e a resolução exata do problema é possível.

Outro algoritmo heurístico que é empregado no problema de alocação de chaves foi proposto por Teng and Lu (2002). Apenas a realocação espacial das chaves em um mesmo alimentador é considerada e o algoritmo apresenta duas fases distintas: na primeira, os autores determinam a direção de busca e, na segunda, analisam o ganho em transferir uma chave para um alimentador vizinho.

A idéia de decompor o problema de alocação também é empregada por Carvalho et al. (2005). A rede é decomposta em trechos independentes, sendo resolvido um problema de alocação de chaves em cada um deles. Os autores não explicitam claramente o cálculo da confiabilidade, apenas mencionam que ela se baseia nos tempos de restauração do serviço.

Recentemente, da Silva et al. (2008) empregaram a metaheurística Busca Tabu Reativa para o problema de alocação de chaves e dispositivos de proteção e isolamento, considerando uma função objetivo que minimiza o custo de instalação e o custo associado às interrupções. São incluídos dados de interrupção por consumidor, com o respectivo tipo associado, para compor a média do custo de interrupção do sistema, sendo que são assumidas interrupções de natureza temporária e interrupções de natureza permanente. A seleção de alguns trechos para receber as chaves é feita com o uso da experiência de especialistas, adotando-se uma representação que corresponde a uma lista de todos

trechos candidatos a receberem dispositivos e cada um dos elementos conterá um valor correspondente ao tipo de dispositivo instalado. O mecanismo de vizinhança é definido alterando-se a posição de um dispositivo instalado para outra, além da alteração do tipo do dispositivo em cada trecho candidato. Os testes obtidos demonstram a aplicabilidade do método em uma rede com 134 barras de carga.

O objetivo principal deste trabalho é apresentar uma metodologia para verificar a confiabilidade obtida com uma certa alocação de chaves, quando são consideradas as restrições elétricas do sistema. A confiabilidade do sistema é medida pela média da carga atendida quando consideradas falhas em cada arco da rede. O limitante obtido é comparado com um outro limitante, proposto anteriormente (Costa et al., 2007), que não considera as restrições elétricas.

O artigo encontra-se organizado da seguinte forma: nas quatro seções a seguir são apresentadas uma descrição dos sistemas de distribuição e o problema de alocação de chaves (seção 2), o método de avaliação da confiabilidade (seção 3), os resultados obtidos (seção 4) e as conclusões e trabalhos futuros (seção 5).

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.

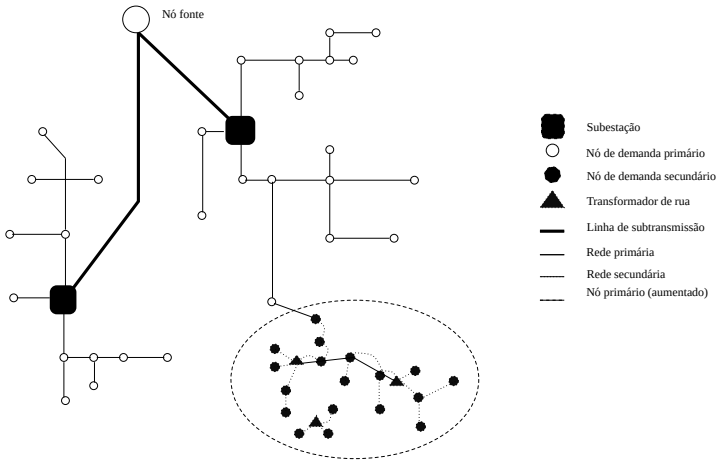


Figura 1: Sistema de distribuição

Até chegar ao consumidor final, a energia percorre um caminho desde o sistema de geração, passando pelas linhas de transmissão e chegando nas subestações onde a tensão é rebaixada para ser entregue aos centros de consumo. Em cada centro de consumo, por sua vez, a tensão é novamente rebaixada para ser entregue nos níveis de consumo habituais (110 ou 220V). Este trabalho se concentra na porção do sistema de distribuição que inclui as subestações e os centros de consumo, mais especificamente na chamada rede primária.

O problema de alocação de chaves compreende a seleção de alguns alimentadores para instalação de dispositivos de seccionamento. Considerando a Figura 2 e assumindo que houve uma falha no alimentador 17, a ausência de chaves ocasionaria a interrupção no fornecimento de todos os consumidores vinculados à sub-árvore que se inicia no alimentador 16. Entretanto, caso houvesse uma chave instalada nos alimentadores principais 16 e 19 e outra no alimentador de suporte 35, a abertura das chaves em 16 e 19 e o fechamento da chave em 35 proporcionaria uma redução dos consumidores afetados com a referida falha.

Uma grande dificuldade para o desenvolvimento de métodos de alocação de chaves consiste no caráter estratégico desta decisão: a configuração de chaves escolhida irá afetar futuras decisões operaci-

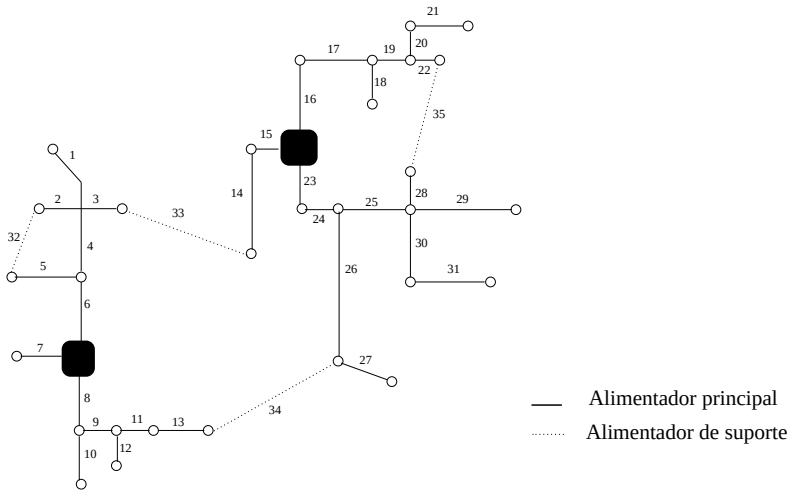


Figura 2: Rede primária - alimentadores principais e de suporte

onais. Conseqüentemente, uma métrica para a *qualidade* de uma solução proposta para este problema estratégico tem que passar, obrigatoriamente, pela mensuração do efeito desta solução na resolução dos problemas de nível operacional associados.

Em particular, a alocação das chaves determina os dados de entrada do problema operacional de restauração de serviço após falhas. Uma alocação de chaves que seja eficiente para o aumento da confiabilidade deve resultar em problemas de restauração de serviço para os quais boas soluções possam ser obtidas. Para se calcular a eficácia de uma solução tentativa para o problema de alocação de chaves, portanto, necessita-se resolver vários problemas de restauração de serviço (um para cada falha possível associada).

Posto desta forma, a dificuldade de resolução do problema de alocação de chaves se torna evidente. De fato, apenas a resolução do problema de restauração de serviço já apresenta uma alta complexidade, vindo este a ser tratado na literatura através de métodos heurísticos. Hongchun et al. (2005), por exemplo, fazem uso de algoritmos baseados em colônias de formigas, enquanto Kumar et al. (2006) utilizam algoritmos genéticos.

Ao se propor um método combinatório para resolução do problema de alocação, diversas soluções tentativas deverão ser, eventualmente, testadas. Cada uma destas soluções necessitará ter sua qualidade medida através de algum procedimento que avalie a qualidade das soluções dos problemas operacionais resultantes. Obviamente, por questões de eficiência computacional, algoritmos sofisticados como os apresentados por Hongchun et al. (2005) e Kumar et al. (2006) não podem ser utilizados dentro de um processo de otimização da alocação de chaves.

Para contornar esta dificuldade, Costa et al. (2007) desenvolveram um algoritmo que substitui a resolução do problema de restauração de serviço por uma análise de conectividade da rede obtida após a falha. Os autores consideram como atendida qualquer área que possa vir a ser conectada a uma subestação operante através da abertura ou fechamento de chaves. Com esta simplificação, os autores conseguem, rapidamente, obter uma medida de confiabilidade para um dado conjunto de chaves. Uma vez que tal medida é conhecida, torna-se possível a aplicação de uma gama de procedimentos de otimização. Os autores efetuaram testes com os métodos guloso e de busca Tabu.

Um dos grandes problemas do método de avaliação de confiabilidade proposto por Costa et al. (2007) é o desprezo de restrições específicas do sistema elétrico. De fato, é possível que o método proposto pelos autores considere como atendidas zonas cujo atendimento acarretaria níveis de tensão abaixo do especificado. Outras duas restrições ignoradas são as capacidades das subestações e dos cabos alimentadores.

Com o objetivo de contornar este problema, a proposta deste trabalho é incluir a consideração destas restrições durante o cálculo da confiabilidade.

3 Avaliação da confiabilidade

A primeira etapa deste novo algoritmo coincide com o a primeira etapa do método de Costa et al. (2007), i.e., para uma dada falha, calcula-se a zona escura, formada por toda a região conectada ao local com problema através de alimentadores sem chaves. Na segunda etapa, a cada nova zona considerada, as restrições elétricas são avaliadas. O **Algoritmo 1** apresenta o método de maneira resumida.

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

```
1: Expande falha f (Obtém área escura).
2: para cada subestação faça
3:    Obtém setor de teste (interconectado).
4:    se setor é factível (Algoritmo 2) então
5:       Marca nós do setor como atingidos
6:       Cria lista com arcos de fronteira, L
7:       enquanto L ≠ ∅ faça
8:          Obtém setor de teste associado a um arco ℓ de L.
9:          L = L\{ℓ}
10:         se setor é factível (Algoritmo 2) então
11:            Adiciona arcos de fronteira à lista L
12:            Marca nós do setor como atingidos
13:         fim
14:      fim
15:   fim
16: fim
17: Retorna % atendida = carga dos nós atingidos / carga total
```

Para exemplificar a aplicação do algoritmo, usamos a Figura 3. Na figura, o nó s com moldura retangular representa a subestação, enquanto os outros nós são nós de demanda. Linhas cheias representam os alimentadores principais enquanto linhas pontilhadas representam alimentadores de suporte. As chaves são representadas por duas pequenas barras paralelas.

Suponha uma falha no alimentador (g, h), como indicado na figura. A primeira etapa do algoritmo expande esta falha até encontrar chaves que possam ser abertas para seu isolamento. No caso deste exemplo, a falha atinge diretamente os nós g, h e i, além dos arcos associados. Esta fase, chamada de fase de obtenção da área escura, implicitamente indica que as chaves nos alimentadores (f, g) e (i, j) são abertas para isolamento da falha.

Passa-se então à fase de tentativa de restauração de serviço. Primeiro examina-se o setor interno conectado à subestação, formado pelos nós a, b, c, f e k. Para este primeiro setor é efetuado um teste de factibilidade (ver **Algoritmo 2**) . Caso este setor seja factível, marcam-se os seus nós como "atingidos" e inicia-se a expansão dos arcos de fronteira, dados pelos alimentadores com chaves que fazem fronteira com a região já considerada. No caso do exemplo, têm-se os seguintes arcos de fronteira: (c, d), (k, l) e (f, g), sendo este último descartado já que o nó destino pertence à zona escura obtida na primeira fase do algoritmo.

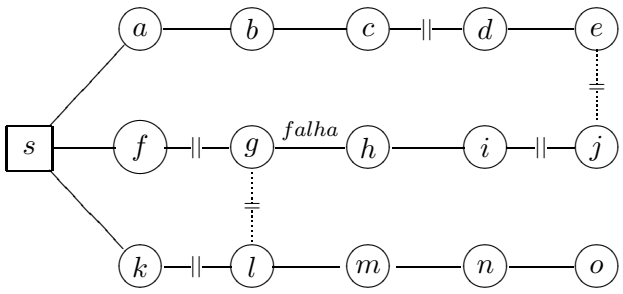


Figura 3: Rede para exemplo de cálculo da carga restaurada a partir de uma falha f

Expande-se, então, um dos arcos de fronteira. Tomando-se, por exemplo, o arco (k, l), obtém-se o novo *setor de teste* formado pelos nós l, m, n e o. Efetua-se um novo teste de factibilidade da rede incluindo os nós já marcados como factíveis mais os nós do setor de teste. Caso esta nova rede seja

factível, marcam-se os nós do setor de teste como atingidos e incluem-se os novos arcos de fronteira, se existentes. No caso do setor $\{ l, m, n, o\}$, nenhum arco de fronteira é incluído já que o único alimentador com chave, (l, g), leva a um nó da zona escura. Expande-se, então, o próximo arco de fronteira, (c, d). O novo setor teste é formado pelos nós d e e. Caso a rede permaneça factível com a inclusão destes nós, eles são marcados como atingidos e o arco (e, j) é adicionado à lista de arcos de fronteira. Neste último caso, finalmente considera-se o setor obtido pela expansão do arco (e, j), formado pelo nó j, que é marcado como atingido caso o teste de factibilidade resulte positivo. Note que neste momento o algoritmo é encerrado uma vez que a lista de arcos de fronteira encontra-se vazia. Caso houvesse outras subestações no problema, o *loop* das linhas 2-16 seria reiniciado, até que todas as subestações tivessem sido testadas.

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 por meio de uma média ponderada.

Em resumo, o **Algoritmo 1** considera seqüencialmente as possíveis decisões sobre aberturas (ou fechamentos) de chaves e, a cada decisão, analisa se as restrições elétricas do sistema são atendidas, através de um teste simples de factibilidade, detalhado no **Algoritmo 2**. Antes de apresentar este segundo algoritmo, detalhamos as equações elétricas utilizadas para os cálculos das tensões e correntes na rede:

$$\text{Parte real da corrente em um nó:} \quad I_{\text{real}} = \frac{PV_{\text{real}}+QV_{\text{imag}}}{V_{\text{real}}^2+V_{\text{imag}}^2}. \tag{1}$$

$$\text{Parte imaginária da corrente em um nó:} \quad I_{\text{imag}} = \frac{QV_{\text{real}}-PV_{\text{imag}}}{V_{\text{real}}^2+V_{\text{imag}}^2}. \tag{2}$$

$$\text{Queda de tensão em um alimentador:} \quad \Delta V = rI_{\text{real}} - xI_{\text{imag}} + j(rI_{\text{imag}} + xI_{\text{real}}). \tag{3}$$

$$\text{Parte real da potência em um nó:} \quad P = V_{\text{real}}I_{\text{real}} - V_{\text{imag}}I_{\text{imag}} \tag{4}$$

$$\text{Parte imaginária da potência em um nó:} \quad Q = V_{\text{real}}I_{\text{imag}} - V_{\text{imag}}I_{\text{real}} \tag{5}$$

$$\text{Potência aparente no nó:} \quad T = \sqrt{P^2 + Q^2} \tag{6}$$

Onde, r e x são a resistência e a reatância do alimentador considerado, respectivamente.

Algoritmo 2 Cálculo de factibilidade de uma rede tentativa

1: Para cada nó: $V_{\text{real}} = 1$, $V_{\text{imag}} = 0$.
2: Calcule a profundidade de cada nó. Seja $pr_{\max}$ o maior valor de profundidade.
3: $erro = \infty$
4: **enquanto** $erro > \epsilon$ **faça**
5: Calcule I_{real} e I_{imag} referente aos nós folha.
6: **para** $pr = (pr_{\max} - 1) \ldots 1$ **faça**
7: Calcule I_{real} e I_{imag} de cada nó.
8: Calcule as correntes de cada alimentador.
9: **fim**
10: **para** $pr = 1 \ldots pr_{\max}$ **faça**
11: Calcule a queda de tensão para cada alimentador.
12: Calcule as novas tensões em cada nó.
13: **fim**
14: **para** cada nó i **faça**
15: calcule a potência aparente $T(i)$ em cada nó i.
16: **fim**
17: erro = max|demanda real do nó i $- T(i)$|
18: **fim**
19: Verifica limite de tensões nos nós.
20: Verifica limite de correntes nos alimentadores.
21: Verifica limite de capacidades nas subestações.
22: **Retorna:** *verdadeiro*, se todas as restrições são satisfeitas e *falso*, caso contrário.

O **Algoritmo 2** utiliza as equações (1)–(6) para calcular iterativamente os valores das tensões e correntes nos nós e alimentadores. Inicialmente, todas as tensões da rede são consideradas iguais

à tensão nominal (linha 1). O algoritmo então cria informações topológicas sobre a rede de teste, ordenando os nós por profundidade (linha 2). A partir daí, calculam-se, alternadamente, as correntes nos nós (correntes fornecidas para as cargas) e nos alimentadores e as tensões na rede. Para as correntes, inicia-se o cálculo a partir dos nós folhas (cuja profundidade é $pr_{\max}$, calculando-se em seguida as correntes dos nós com profundidade $pr_{\max} - 1$ e assim sucessivamente até chegar-se ao nó raiz (linhas 5–9). Para as quedas de tensão, inicia-se pelo nó raiz e avança-se progressivamente até chegar-se aos nós folhas (linhas 10-13). O critério de parada é dado pela proximidade da potência calculada em cada nó com o valor real de demanda (linhas 14–17). Uma vez atendido o critério de parada, verifica-se a compatibilidade dos níveis de corrente e tensão obtidos com as restrições elétricas do sistema.

Uma característica muito interessante deste algoritmo é o fato dele fornecer também uma solução para o problema operacional de restauração. Note que o respeito às principais restrições elétricas garante que a confiabilidade correspondente à melhor solução gulosa é um *limitante inferior* para a confiabilidade média real do sistema associada a este conjunto de chaves (existentes e novas), supondo que a falha é singular.

Devido ao fato de recorrermos a um processo iterativo de cálculo das variáveis elétricas (**Algoritmo 2**) a cada novo setor avaliado no **Algoritmo 1**, nomeamos o novo avaliador de confiabilidade de *Avaliador Dinâmico*. Na próxima seção, este avaliador é submetido a testes computacionais.

4 Resultados

O método de avaliação da confiabilidade foi testado em instâncias adaptadas de duas redes reais (Garcia, 2005), usadas também por (Costa et al., 2007). 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. Para as instâncias, consideram-se situações com o número de chaves iguais a 5, 10, 15 e 20.

Para testar a eficiência do novo método de avaliação, usamos os algoritmos desenvolvidos por Costa et al. (2007). Naquele trabalho, foram desenvolvidos algoritmos guloso e Tabu. No algoritmo guloso, considerando-se que se deseja instalar k chaves, efetua-se a instalação de uma chave por vez, maximizando o ganho incremental (dado pelo método de avaliação da confiabilidade utilizado) a cada chave instalada. No algoritmo Tabu, é determinada uma vizinhança (dada pela mudança de posição de uma única chave) e esta vizinhança é percorrida em busca da melhor solução. Permite-se uma degradação do valor da solução (para evitar aprisionamento em mínimos locais) e respeita-se uma duração mínima entre a repetição de um mesmo movimento (duração tabu).

Devido aos cálculos iterativos das restrições elétricas, a convergência do Avaliador Dinâmico (AvDin) é mais lenta que aquela obtida pelo avaliador desenvolvido em (Costa et al., 2007) que só leva em consideração as restrições de conectividade (AvCon). Esta maior lentidão impede a utilização do método de busca Tabu. Entretanto, os resultados nas Tabelas 1 e 2 indicam que ainda assim é interessante o uso do novo método avaliador.

Nas tabelas comparamos os resultados obtidos com a combinação Algoritmo guloso / AvDin com os resultados obtidos pelo algoritmo mais sofisticado (Tabu) utilizado com o método de avaliação mais simples (AvCon). Como mencionado anteriormente, AvDin fornece um limitante inferior para a confiabilidade do sistema. AvCon, por sua vez, fornece um limitante superior para esta mesma confiabilidade, uma vez que considera apenas a conectividade do sistema. Para cada um dos dois métodos, apresentamos os valores obtidos por estes dois avaliadores sob a sigla LS (limitante superior, dado pelo AvCon) e LI (limitante inferior, dado pelo AvDin). Assim, para o método Algoritmo guloso / AvDin, apresentamos não apenas o limitante inferior (que neste caso foi usado durante a otimização), mas também o valor do limitante superior obtido pela solução gerada. Analogamente, para o método Tabu / Avcon, apresentamos não apenas o limitante superior, mas também o valor do limitante inferior obtido pela solução gerada.

Os resultados expressos nas Tabelas 1 e 2 indicam que o algoritmo guloso operando com o avaliador

Tabela 1: Resultados obtidos para queda de tensão máxima = 5% (Vlim = 0,95)

Inst		Tabu			Guloso		
	# Ch.	**LS (%)**	**LI (%)**	**t(s)**	**LS (%)**	**LI (%)**	**t(s)**
R1U	5	64,20	44,03	1,75	54,92	**54,92**	0,20
R1U	10	77,75	70,27	3,45	74,91	**72,82**	0,67
R1U	15	81,63	74,43	4,25	79,92	**78,88**	1,44
R1U	20	83,05	78,03	4,80	81,82	**80,68**	2,56
R1A	5	65,85	61,32	1,78	65,63	**61,81**	0,17
R1A	10	78,42	**73,65**	3,30	74,03	73,31	0,67
R1A	15	82,23	**79,85**	3,69	77,15	76,81	1,38
R1A	20	83,85	**80,11**	4,34	81,25	79,81	2,28
R2U	5	89,74	74,57	44,73	88,85	**87,87**	11,25
R2U	10	92,49	80,69	84,27	91,29	**90,34**	34,30
R2U	15	94,12	79,77	115,31	92,57	**91,62**	64,50
R2U	20	95,03	80,08	150,03	93,39	**92,40**	94,66
R2A	5	89,89	75,97	43,28	89,04	**87,58**	11,25
R2A	10	92,52	77,05	80,91	91,05	**89,69**	31,95
R2A	15	94,17	80,91	112,44	92,31	**91,46**	61,59
R2A	20	95,11	84,49	150,72	93,26	**92,25**	94,30

Tabela 2: Resultados obtidos para queda de tensão máxima = 3% (Vlim = 0,97)

Inst		Tabu			Guloso		
	# Ch.	**LS (%)**	**LI (%)**	**t(s)**	**LS (%)**	**LI (%)**	**t(s)**
R1U	5	64,20	39,58	1,74	55,40	**46,31**	0,16
R1U	10	77,75	59,28	3,48	74,81	**64,49**	0,66
R1U	15	81,63	63,83	4,08	78,69	**72,25**	1,39
R1U	20	83,05	69,13	4,63	81,82	**75,19**	2,30
R1A	5	65,85	47,50	1,81	56,64	**53,11**	0,16
R1A	10	78,42	66,34	3,25	71,03	**67,09**	0,64
R1A	15	82,23	72,42	3,78	80,03	**74,52**	1,31
R1A	20	83,85	75,07	4,23	82,13	**77,13**	2,22
R2U	5	89,74	35,33	44,73	86,15	**66,39**	9,14
R2U	10	92,49	48,21	84,05	87,99	**73,85**	20,89
R2U	15	94,12	55,12	116,28	89,55	**75,95**	38,78
R2U	20	95,03	55,71	149,95	90,70	**76,72**	57,91
R2A	5	89,89	39,29	43,09	86,21	**67,49**	8,91
R2A	10	92,52	50,59	80,55	87,82	**69,09**	20,59
R2A	15	94,17	60,67	112,38	89,49	**72,97**	34,41
R2A	20	95,11	61,44	152,17	90,70	**73,85**	54,17

dinâmico consegue melhores limitantes inferiores do que os obtido pelo método apresentado em (Costa et al., 2007) - algoritmo Tabu operando com o avaliador de conectividade. A conclusão é que é mais proveitoso usar-se o tempo computacional para obter boas aproximações do valor da confiabilidade e integrar este método de avaliação em um algoritmo mais simples do que utilizar o tempo em uma busca mais elaborada, operando sobre um método de avaliação mais simples. De fato, dos 32 casos testados, em 3 (VLim = 0,95, testes com 10, 15 e 20 chaves para instância R1A) o método Tabu com AvCon (LS) obteve valores um pouco melhores para a confiabilidade. Para todos os outros 29 casos, o método guloso com o avaliador proposto (AvDin) foi mais eficiente, sendo que em alguns casos a diferença foi significativa. Veja, por exemplo, o caso com VLim = 0,97, instância R2U com 5 chaves, onde os valores obtidos com o novo método proposto quase que dobraram o valor da confiabilidade obtida.

Em relação aos limitantes superiores, obteve-se o resultado esperado: o algoritmo Tabu operando com AvCon obteve melhores limitantes superiores. Dois fatos, entretanto, merecem nota. Em primeiro lugar, nota-se que a diferença entre os valores obtidos para o limitante superior foi bem menos

significativa. Além disso, sabe-se que AvCon ignora completamente as restrições elétricas e portanto, espera-se que um valor mais realista para a confiabilidade do sistema seja dado por AvDin.

Finalmente, notamos também que os limitantes superiores e inferiores obtidos no caso da utilização do AvDin são relativamente próximos, o que indica que o método de avaliação dinâmica desenvolvida consegue estimar corretamente a confiabilidade dada por um conjunto de chaves.

As medidas foram obtidas em uma máquina Intel com de $2,33$ GHz e com 2 GB de memória RAM. Todos algoritmos foram implementados em C++. Observa-se que as duas combinações de algoritmos obtiveram tempos similares, sendo o método guloso um pouco mais rápido, sobretudo para o caso da Tabela 2.

5 Conclusões e trabalhos futuros

Neste trabalho, apresentamos um novo método para avaliação da confiabilidade dada por um conjunto de chaves, em um sistema de distribuição de energia elétrica. O novo método leva em consideração as restrições elétricas do sistema e, por isso, é capaz de fornecer uma medida mais precisa da confiabilidade. Testes computacionais mostraram que, apesar do novo método de avaliação ser mais custoso computacionalmente, é vantajosa a sua utilização. Trabalhos futuros incluem a melhoria da eficiência computacional do método proposto, de modo a torná-lo mais rápido e, portanto, passível de ser utilizado em métodos de otimização mais sofisticados e que demandem um número maior de avaliações por simulação.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq (Projeto 554900/2006-8).

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.

Costa, A. M., Ritt, M., Buriol, L. and Garcia, M. (2007). Alocação de chaves para a melhoria da confiabilidade da rede elétrica de distribuição de energia elétrica, Anais do XXXIX Congresso da Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional, Fortaleza, Brasil, pp. 445–455.

da Silva, L. G. W., Pereira, R. A. F., Abbad, J. R. and Mantovani, J. R. S. (2008). Optimised placement of control and protective devices in electric distribution systems through reactive tabu search algorithm, *Electric Power Systems Research* **78**: 372–381.

Garcia, V. J. (2005). *Metaheurísticas multiobjetivo para o problema de restauração do serviço em redes de distribuição de energia elétrica*, PhD thesis, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - UNICAMP, Campinas, Brazil.

Hongchun, S., Hongchun, S. and Xiangfei, S. (2005). A novel approach to distribution network reconfiguration considering the priority of customers, Proceedings of the Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific IEEE/PES, pp. 1–4.

Kumar, Y., Das, B. and Sharma, J. (2006). Service restoration in distribution system using non-dominated sorting genetic algorithm, *Electric Power Systems Research* **76**: 768–777.

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