

Desenvolvimento de Algoritmos Matemáticos para a Otimização do Sistema de Distribuição de Energia Elétrica

F. A. Gruppelli Junior – COPEL

M.T.A. Steiner, J.Y. Yuan, C. Carnieri, N.M.P. Volpi, V.E. Wilhelm, N.H. Mussi, C.F. Antonio, E. Miqueles, E.L. Andretta Filho, E.M. Kalinowski, A.C. Alves, C. Gulin - Universidade Federal do Paraná – Departamento de Matemática / PPGMNE
V.C. Zambenedetti, M. Klimkowski – LACTEC

RESUMO

Este artigo aborda o problema da recomposição de um sistema de distribuição de energia elétrica após a localização e isolamento da área com defeito. Propõe-se a determinar uma seqüência de manobras para o restabelecimento da área desenergizada atendendo o máximo de carga no menor tempo possível. Para isto utiliza-se de um Método Exato, através de dois métodos, ditos Método Exato, com programação linear inteira mista e Método de Busca Heurística. Os dois métodos foram aplicados em redes de distribuição reais que compõem o banco de dados geo-referenciado da COPEL. Propõe-se também a simplificação de circuitos como forma de redução do esforço computacional.

PALAVRAS-CHAVE

Recomposição de Sistemas de Distribuição; Reconfiguração de Redes de Distribuição; Heurísticas; Programação Linear Inteira Mista.

I. INTRODUÇÃO

Quando a energia é interrompida torna-se imprescindível recompor o sistema em uma configuração ótima no menor tempo possível. Algumas necessidades práticas foram levantadas para a execução do projeto e estão listadas abaixo:

- Encontrar uma configuração no menor tempo possível e que não viole as restrições. Evidentemente, espera-se que o tempo de resposta seja proporcional ao tamanho e complexidade da área em análise.
- Minimizar o número de manobras envolvidas em cada configuração.
- Recompôr maior quantidade de carga possível.
- Nenhum equipamento ou componente do sistema deve ser sobrecarregado.
- Manter a radialidade do sistema.

Em geral, o problema é combinatorial, multi-objetivo, não-linear e sujeito a restrições operacionais. O

tamanho do problema depende essencialmente da quantidade de chaves envolvidas na busca de uma configuração ótima, sendo que 2^n combinações podem ser geradas, onde n é o número de chaves envolvidas.

A. Descrição do Problema.

Em grandes centros urbanos temos configurações de redes complexas e com várias opções de manobra através de chaves normalmente-abertas (NA) ampliando o tamanho do problema.

Este problema tem recebido atenção nos últimos anos e diversas abordagens têm sido propostas usando métodos de otimização, heurísticas e sistemas especialistas.

Ciric e Popovic[1] propuseram uma metodologia que combina uma abordagem heurística e Programação Inteira Mista para resolver o problema da recomposição. Devido a sua eficiência computacional, esta abordagem pode ser utilizada tanto em ambientes de planejamento quanto de operação.

Hsu et al.[2] propõem um plano de recomposição próprio depois da localização da falta ter sido feita e a região isolada. Como é um assunto urgente no sistema de operação de distribuição, o plano deve ser alcançado em um curto período de tempo. Além disso, a área fora de serviço deve ser minimizada. Para atingir um plano que satisfaça todas as necessidades práticas, um conjunto de regras heurísticas é compilado através de entrevistas com operadores experientes.

Nagata et al.[3][4] desenvolvem um método interligando o uso de Sistemas Especialistas e uma abordagem de Programação Matemática. Todo o problema é decomposto em subproblemas de acordo com conhecimentos genéricos de especialistas. A introdução de um novo conceito (custo de operação) reflete as várias estratégias e diminuiu o número de regras do Sistema Especialista.

Shirmohammadi [5] descreve o princípio e a implementação de uma metodologia heurística para recompor o sistema em porções isoladas. A metodologia determina um número mínimo possível de operações de necessárias. Res-

Este trabalho faz parte do Programa Anual de Pesquisa e Desenvolvimento da COPEL Distribuição, ciclo 2000/2001 e está sendo realizado em parceria com a Universidade Federal do Paraná (UFPR) e LACTEC

trições de operação são consideradas na recomposição.

Morelato e Monticelli [6] tratam de problemas relacionados à busca heurística em profundidade, auxiliados pela experiência do operador para direcionar a busca. A estrutura proposta permite resolver uma grande variedade de problemas.

Hattori et al.[7] propõem um novo algoritmo para a construção de procedimentos de recomposição de uma rede de distribuição em que grande parte da energia está cortada.

Kuo e Hsu[8] desenvolveram uma abordagem baseada na teoria dos conjuntos difusos para estimar as cargas em um sistema de distribuição com o objetivo de planejar o serviço de restauração seguido a uma falta.

B. Simplificação do Cadastro da Rede

Alimentadores de distribuição, enquanto fazem parte do banco de dados SIG, possuem de 400 até 5000 objetos(elementos) que podem ser trechos, chaves, equipamentos ou postos de transformação. Isto implica em considerável tempo de processamento para cálculos de fluxo de potência.

Para atender as necessidades de processamento e resposta em tempos adequados foi realizada uma simplificação dos circuitos geo-referenciados em duas etapas. Na primeira etapa várias partes do alimentador são colapsadas de maneira a formar blocos de carga (trechos entre chaves). Nesta etapa já é possível obter ganhos em relação ao tamanho original (Ver Tabela 1). Numa segunda etapa, os ramais sem interligação com outros alimentadores são também reduzidos e formam apenas um bloco de carga. Dessa forma consegue-se real diminuição na quantidade de objetos. Em média a quantidade de elementos torna-se apenas 6% da configuração original.

TABELA 1

Resultados da simplificação da rede

Alimentador	Elementos Original	Elementos após Etapa 1	Elementos após Etapa 2
Alim 75	288	92	18
Alim 24	482	122	25
Alim 25	474	139	25
Alim 31	405	107	22
Alim 33	351	138	28
Alim 34	352	132	23
Alim 39	303	107	22
Alim 49	602	141	27
Média	407	122	24

II. ALGORITMOS E MÉTODOS PROPOSTOS

A. Programação Matemática - Método Exato

O modelo desenvolvido foi inspirado em Ciric e Popovic [1] e utiliza-se de Programação Linear Inteira

Mista baseando a busca em variantes onde a área desenergizada é suprida por alimentadores adjacentes(rede local). A função objetivo pode ser expressa por:

$$\min W = \alpha \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (1 - X_{ij} - X_{ji}) C X_{ij} + (Y_{ij} + X_{ji}) C Y_{ij} - \beta \sum_{i=1}^N L_i Z_i \quad (1)$$

onde

W - função objetivo.

α e β - parâmetros modificados em função do caráter multi-objetivo .

N - número total de nós da rede local.

C - custo operacional das chaves(C=1 para chaves de operação sob carga e C=10, para outros tipos de chaves).

X_{ij} - variável inteira que representa o status da chave depois da recomposição, se a chave estava fechada antes do procedimento. $X=1$ se a chave é fechada após o procedimento.

Y_{ij} - variável inteira que representa o status da chave após a recomposição, se a chave estava aberta antes do procedimento. $Y=1$ se a chave é fechada após o procedimento.

Z_i - variável inteira que denota o status da carga(bloco).

$Z=1$ se a carga é atendida após o procedimento.

L_i - vetor de carga dos nós.

Restrições:

a) Balanço de potência

$$\sum_{k=1}^N A_{ik} (IC_{ki} - IC_{ik}) = L_i Z_i \quad \forall \text{bloco } i \text{ não fonte} \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^N (AX_{ik} + AY_{ik}) IC_{ki} \leq L_i \quad \forall \text{bloco } i \text{ fonte} \quad (3)$$

b) radialidade.

$$\sum_k AX_{ik}^G X_{ki} + \sum_k AY_{ik}^G Y_{ki} \leq Z_i \quad \forall \text{bloco } i \text{ não fonte} \quad (4)$$

$$\sum_k AX_{ik}^G X_{ki} + \sum_k AY_{ik}^G Y_{ki} \leq 0 \quad \forall \text{bloco } i \text{ fonte} \quad (5)$$

c) capacidade dos trechos

$$IC_{ij} \leq IMX_{ij} X_{ij} \quad \forall i,j | IMX_{ij}^1 0 \quad (6)$$

$$IC_{ij} \leq IMY_{ij} Y_{ij} \quad \forall i,j | IMY_{ij}^1 0 \quad (7)$$

d) bloco atendido por apenas uma chave

$$X_{ij} + X_{ji} \leq 1 \quad \forall i,j | AX_{ij} \neq 0 \quad (8)$$

$$Y_{ij} + Y_{ji} \leq 1 \quad \forall i,j | AY_{ij} \neq 0 \quad (9)$$

onde:

A- matriz de adjacência que fornece as ligações

IC -matriz das correntes em cada trecho.

IMX, IMY - matriz das capacidades máximas por trecho.

O objetivo é recompor a maior quantidade de consumidores, expresso pela carga, no menor tempo possível, expresso pela quantidade de chaves a ser manobrada. Na função objetivo (1) o primeiro termo minimiza o número de manobras a ser realizado e segundo termo minimiza a carga não atendida.

Existem chaves que possuem preferência para serem usadas em caso de manobras. São chaves de operação sob carga que possuem um custo operacional menor, e têm a sua utilização priorizada na escolha da melhor seqüência.

Através da criação de uma rede local com um determinado número de alimentadores, adjacentes ou não, procura-se reduzir o tamanho do problema e tornar a solução mais objetiva. Estes alimentadores estão destinados a receber parte da carga da área desenergizada. Equações são geradas e submetidas à solução através de um *solver* (*LINGO -Language for Interactive General Optimizer*). É verificado, então, qual a capacidade de reserva que cada alimentador dispõe, que é achado pela diferença entre a carga que está sendo suprida e sua capacidade máxima permitida.

Evidentemente que mudanças na configuração da rede vão causar mudanças nas tensões e correntes dos trechos. Estes valores precisam ser checados para verificar se nenhuma restrição foi violada.

A variação dos valores de α e β nos dá uma idéia das soluções possíveis levando em conta o caráter multi-objetivo para atender cargas e recompor o sistema no menor tempo possível. Como resultado obtém-se a seqüência de manobras para isolar a área faltosa, as chaves NA (Normalmente abertas) que devem ser fechadas e as NF (Normalmente fechadas) que devem ser abertas.

Caso não seja possível atender todas as cargas é proposto um corte de carga, sendo informado as chaves que deverão ser abertas e qual o montante a ser cortado.

B. Método de Busca Heurística

O Método de Busca Heurística foi inspirado nos artigos de Hsu et al.[2] e Nagata et al.[3] e é apresentado sucintamente no Fluxograma da Figura 1. Este método pode ser descrito como se segue.

Após identificado o bloco com defeito, o primeiro passo é identificar todas as chaves vizinhas a esse bloco (nó) e abri-las. Para cada chave aberta (exceto a que pode ser energizada pelo próprio alimentador), ter-se-á uma subárvore, composta por um só bloco, ou por vários blocos, sendo que cada uma destas subárvores precisa ser reenergizada.

É importante notar que cada uma dessas subárvores é independente das outras, excetuando-se possíveis ligações com chaves de *loop*, e que reenergizar, ainda que completamente uma dessas subárvores, não garante o restabelecimento das outras.

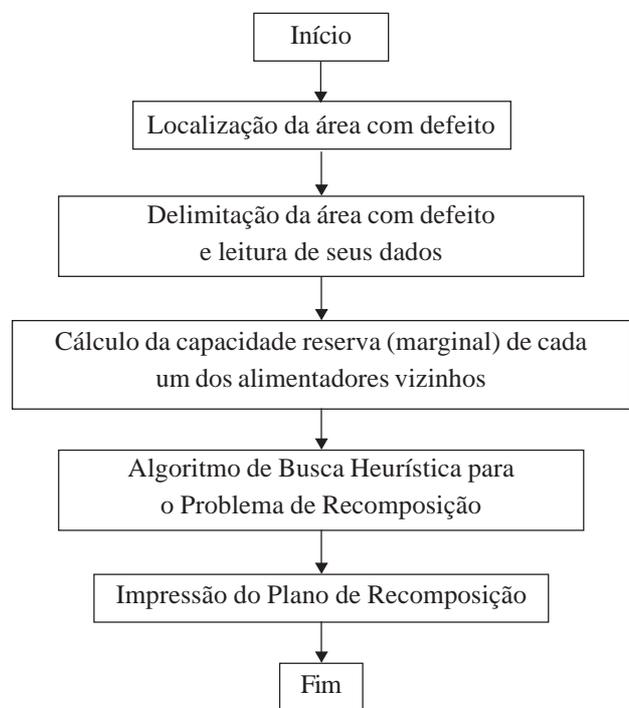


FIGURA 1 – Fluxograma do procedimento heurístico

Ao tratar-se especificamente de cada subárvore, tentar-se-á, primeiramente, fechar chaves de *loop* para solucionar parcial ou totalmente o problema. Para isso, mantém-se uma lista dos blocos que estão alimentados. Verifica-se, então, se há alguma chave de *loop* interligando algum bloco alimentado a um não alimentado. Se houver, fecha-se essa chave, e considera-se a subárvore onde está esse bloco como já resolvida. Adicionam-se à lista de nós alimentados, todos os nós dessa subárvore. Repete-se o processo até que não se possa mais alimentar novos nós.

Caso haja ainda uma ou mais subárvores não recompostas, utiliza-se o processo descrito a seguir para cada uma delas:

- Em primeiro lugar, faz-se uma lista de todas as possibilidades de conexão com alimentadores vizinhos a esta subárvore;
- Se não for possível atender toda a subárvore com uma ligação só, tenta-se determinar o máximo (em termos de carga) que se pode atender com uma ligação;
- Se não houver uma ligação que resolva totalmente o problema, tenta-se resolver o problema envolvendo dois alimentadores vizinhos;
- Repete-se o mesmo procedimento para todos os outros pares de alimentadores vizinhos;
- Cada vez que se encontra uma solução viável, calcula-se um valor para essa solução da seguinte forma:

$$Z = C + \sum k_i \quad (10)$$

onde :

C é a carga não atendida

k_i é o peso da chave i , onde i varia de 1 até o número de chaves que foram abertas ou fechadas (chaves manobradas).

Chaves prioritárias têm pesos menores e chaves não prioritárias têm pesos maiores. As n melhores soluções (n é um parâmetro dependente de cada problema) são armazenadas pelo programa;

- Caso não tenha sido encontrado um atendimento total ligando-se dois vizinhos, faz-se a mesma coisa para três vizinhos à subárvore;
- Caso o programa ache uma solução para atendimento total em qualquer estágio do procedimento apresentado, a busca é interrompida e o resultado final e/ou os parciais são apresentados;
- Em seguida, procede-se da mesma forma para a próxima subárvore, caso haja, repetindo-se todo o procedimento, atualizando-se as cargas reservas dos alimentadores vizinhos.

III. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

A. Exemplo Acadêmico

Considere a seguinte rede R(E,V), sub-dividida em S¹, S² e S³ alimentadores. Os alimentadores estão interligados através de blocos de ligação que representam as chaves NA. Um defeito será gerado para o bloco 2 do alimentador 1. Figura 2.

Considerando o peso para minimizar o tempo e as cargas como sendo o mesmo ($a=1$ e $b=1$) e utilizando os dois métodos anteriormente propostos obtém-se a seqüência de manobras usada na tentativa de restabelecer o sistema. Pode-se ver na Figura 2 o resultado.

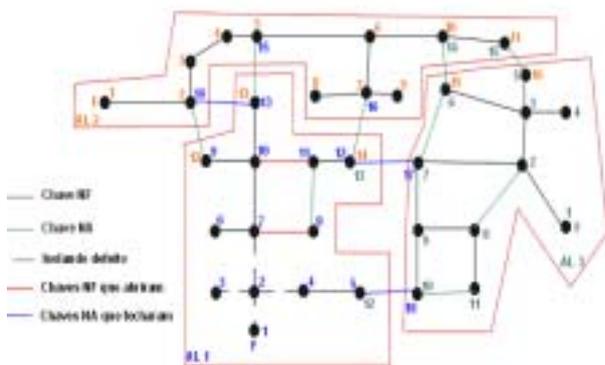


FIGURA 2 – Resultado após procedimentos

Resultados:

Total de manobras: 5.

Chaves utilizadas para isolar o defeito: (1,2), (3,2), (4,2), (7,2)

Chaves abertas: (8,7), (10,11)

Chaves fechadas: (5,18), (12,18), (13,17)

Corte de carga: nó 8.

Para este exemplo os dois métodos encontraram o mesmo resultado.

IV. MINIMIZAÇÃO DE PERDAS

O objetivo desta etapa do projeto é apresentar técnicas matemáticas que possam ser utilizadas visando a redução de perdas de energia elétrica obtendo desta forma uma maior racionalização dos recursos energéticos.

Dada a estrutura de uma rede elétrica (nós (blocos) e arcos (chaves)), sendo as chaves manobráveis ou não, e as suas respectivas localizações e demais informações, a dificuldade de se obter a reconfiguração ótima, está em identificar os estados ON/OFF (fechada/aberta) das chaves que permitirão a minimização das perdas na rede radial a ser obtida para a distribuição da energia elétrica.

O modelo proposto neste trabalho para abordar o problema de redução de perdas está baseado no trabalho de Sarma e Rao [11]. Supondo que a atual configuração já esteja próximo da configuração ótima, a proposta é fazer uma troca do estado das chaves normalmente abertas, incluindo as chaves que interligam os alimentadores e as chaves de loops internos no alimentador. A escolha das chaves que mudam de estado é feita através de uma rotina de otimização, baseada em programação binária, com função objetivo não-linear e restrições lineares.

O critério para a decisão da melhor configuração, neste trabalho, é o cálculo do “momento elétrico”, valor dado pela somatória de *resistência x corrente*² para todos os trechos de um alimentador. O menor valor do momento elétrico indicaria a melhor configuração. O momento elétrico da rede considerada é definido como:

$$P = \sum_{lm} r_{lm} i_{lm}^2 + \sum_{ij} r_{ij} \left\{ x_{ij} \left[I_j + \sum_{q=1}^p x_{jk_q} I_{k_q} \right] \right\}^2 + \sum_{jk} r_{jk} I_k^2 x_{ij} x_{jk}$$

sujeito às restrições:

$$x_{ij} + x_{jk} + x_{kw} = 2, \text{ para trechos com grau}(j) = 1$$

$$\left. \begin{aligned} x_{ij} + x_{jk_q} + x_{k_q w_q} &\leq 2, \text{ para } q=1, \dots, p \\ x_{ij} + \sum_{q=1}^p x_{jk_q} + \sum_{q=1}^p x_{k_q w_q} &= \text{grau}(j) + 1 \end{aligned} \right\} \text{ para trechos com grau}(j) > 1$$

$$x_{jk} + x_{kw} = 1, \text{ para trechos com loop interno}$$

onde:

grau do trecho: quantidade de chaves NA consideradas

lm trechos sem chave NA (variável associada)

ij trechos fechados com chave NA (variável associada)

jk trechos abertos

V. CONCLUSÕES

Neste artigo foram mostrados dois métodos para resolver o problema da recomposição de sistemas de distribuição a partir de uma rede geo-referenciada utilizando para isso programação linear inteira mista e heurísticas.

Percebe-se que é possível reduzir circuitos comple-

xos em modelos simples de forma que os perfis de tensão e corrente tenham erros desprezíveis. A integração entre Sistemas de Informações Geográficas e ferramentas computacionais para análise da configuração do sistema é imprescindível pela sua atualização e modernidade.

Os dois métodos são adequados para solução do problema e podem ser usados em redes de tamanho real. O modelo de Programação Linear Inteira Mista consegue reduzir consideravelmente o tamanho do problema ao utilizar o conceito de rede local fazendo uma abordagem bem objetiva do problema. O modelo heurístico produz soluções consideravelmente rápidas, normalmente em tempos menores que 01 segundo, atingindo objetivos práticos em relação à sua utilização futura em ambiente de Centros de Operação da Distribuição (COD's).

Os dois métodos estão sendo adaptados para sua utilização prática e combinada procurando refletir simulações reais nas redes de distribuição COPEL.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ciric, R.M.; Popovic, D.S. "Multi-objective Distribution Network Restoration using Heuristic Approach and Mix Integer Programming Method". *Electrical Power and Energy Systems* v.22, 2000..
- [2] Hsu, Y.Y.; Huang, H.M.; Fuo, H.C.; Peng, S.K.; Ghang, K.J.C.; Yu, H.S.; Chow, C.E.; Kuo, T.T. "Distribution System Service Restoration using a Heuristic Search Approach". *IEEE*, 1991.
- [3] Nagata, T.; Hatakeyama, S.; Yasuoka, M.; Sasaki, H.; "An efficient Method for Power Distribution System Restoration Based on Mathematical Programming and Operation Strategy". *IEEE* 2000.
- [4] Nagata, T.; Sasaki, H. e Yokoyama, R. "Power System by Joint Usage of Expert System and Mathematical Programming Approach". *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 10, n. 3, 1995.
- [5] Shirmohammadi, D. "Service Restoration in Distribution Networks via Network Reconfiguration". *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 7, n. 2, 1992.
- [6] Morelato, A.L. e Monticelli, A. "Heuristic Search Approach to Distribution System Restoration". *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 4, n. 4, 1989.
- [7] Hattori, M.; Kaneshige, Y.; Shimada, K.; Takashi, K.; "A New Distribution Power Network Restoration Algorithm Based on Modern Heuristic Method". *IEEE*, 2000.
- [8] Kuo, H-C; Hsu, Y.-Y. "Distribution System Load Estimation and Service Restoration using a Fuzzy Set Approach". *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.8, n. 4, 1993.
- [9] Silva, W.C. "Método Otimizado de Simulação do Sistema Elétrico de Distribuição". *CIER-Seminário Internacional sobre Planejamento e Qualidade em Sistemas de Distribuição*. Puerto Iguazu. 2001.
- [10] Krishnan, S.K.; "Graph Algorithms for Loss Minimization through Feeder Reconfiguration". *Master Thesis-Indian Institute of Science*, 1998.
- [11] Sarma, N. D. & Rao, K. S. P., A new 0-1 integer programming method of feeder reconfiguration for loss minimization in distribution systems, *Electric Power Systems Research*, v.33, p.125-131, 1994.
- [12] Civanlar, S., Grainger J. J., Yin, H. & Lee, S. S. H., Distribution feeder reconfiguration for loss reduction. *IEEE Trans. Power Delivery*, v.3, n.3, pp. 1217-1223, 1988.