

Algoritmos para Recomposição de Sistemas de Distribuição.

F. A. Gruppelli Junior - COPEL, J.Y. Yuan, C. Carnieri, N.M.P. Volpi, M.T.A. Steiner, V.E. Wilhelm, N.H.Mussi, C.F.Antonio, E. Miqueles, E.L. Andretta Filho, E.M. Kalinowski, A.C. Alves, C. Gulin, -UFPR, V.C.Zambenedetti, M.Klimkowski-LACTEC

E-mail: fernando.gruppelli@copel.com

Palavras-chave – Recomposição de Sistemas de Distribuição; Reconfiguração de Redes de Distribuição; Heurísticas; Programação Linear Inteira Mista.

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 Programação Linear Inteira Mista e um Método de Busca Heurística. Os dois métodos foram aplicados em redes de distribuição reais que compõem o banco de dados georeferenciado da COPEL. Propõe-se também a simplificação de circuitos como forma de redução do esforço computacional.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Descrição do Problema.

As concessionárias têm sido estimuladas a melhorar o serviço prestado aos consumidores através da supervisão, controle e avaliação de indicadores de continuidade da distribuição de energia elétrica. Dessa forma tornam-se objetivos primários manter um serviço adequado e a continuidade do fornecimento de energia aos consumidores tanto quanto possível.

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. Os resultados podem fornecer configurações ótimas e subótimas que reflitam ganho na tomada de decisão pelos operadores.

- Minimizar o número de manobras envolvidas em cada configuração. Aumentando o número de manobras em grandes centros aumenta o custo operacional e o tempo para recompor toda a área desenergizada e diminui a vida útil das chaves.
- Recompor 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. Podemos ter uma noção da complexidade do problema na Figura 1, onde uma configuração com apenas 04 chaves leva a 16 combinações geradas.

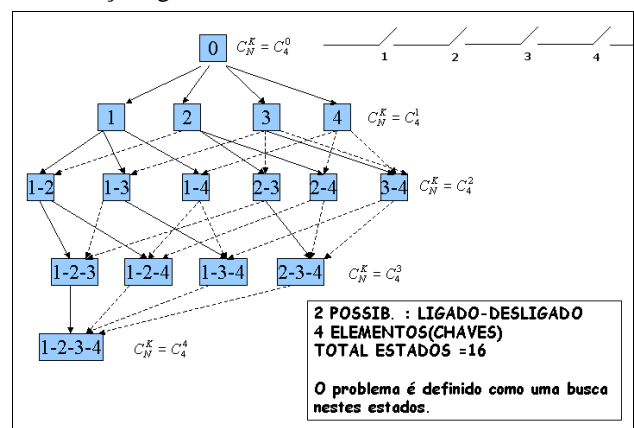


Figura 1 – Exemplo da complexidade do problema para um trecho com apenas 04 chaves.

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] propõem um algoritmo para uma solução rápida e eficiente computacionalmente e que está baseado em uma abordagem de Programação Matemática. O tempo computacional melhorou bastante ao se dividir o problema em dois estágios e incorporando estratégias derivadas da experiência do operador.

Nagata et al.[4] desenvolvem em um outro trabalho 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. Restrições 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.

1.2. Redes Geo-referenciadas

Sistemas de Informações Geográficas(SIG) formam a base de dados para as áreas de operação, cadastro e comercial, possuindo atualização diária. Estes sistemas possuem grandes quantidades de objetos e excesso de informações para processamento conduzindo a tempos excessivos nas simulações e cálculos elétricos. Diversas aplicações que procuram integrar-se a estes sistemas enfrentam grande dificuldade[9] e necessitam de simplificações e técnicas de compressão[10].

2. ALGORITMOS E MÉTODOS PROPOSTOS

2.1. Integração com o SIG(Sistema de Informações Geográficas).

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 e que pode ser

observada na Tabela 2. Em média a quantidade de elementos torna-se apenas 6% da configuração original.

TABELA 1
RESULTADOS DA SIMPLIFICAÇÃO DA REDE(ETAPA 1).

Alimentador	Elementos Original	Elementos após Etapa 1	% Original
Alim 75	288	92	31,94
Alim 24	482	122	25,31
Alim 25	474	139	29,32
Alim 31	405	107	26,42
Alim 33	351	138	39,32
Alim 34	352	132	37,50
Alim 39	303	107	35,31
Alim 49	602	141	23,42
Média	407	122	31,06

TABELA 2
RESULTADOS DA SIMPLIFICAÇÃO DA REDE(ETAPA 2).

Alimentador	Elementos Original	Elementos após Etapa 2	% Original
Alim 75	288	18	6,25
Alim 24	482	25	5,19
Alim 25	474	25	5,27
Alim 31	405	22	5,43
Alim 33	351	28	7,98
Alim 34	352	23	6,53
Alim 39	303	22	7,26
Alim 49	602	27	4,49
Média	407	24	6,05

As simplificações procuram manter os perfis de corrente e tensão dos alimentadores e não alterar os blocos de carga de forma que ao serem transferidos ou remanejados reflitam a situação real.

2.2. 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:

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

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

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

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

b) radialidade.

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

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

c) capacidade dos trechos

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

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

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.

2.3. Heurísticas

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 2. 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.

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. Inicialmente essa lista contém só os blocos que estão antes do defeito e que portanto não foram afetados. 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. Prioriza-se a ligação com o alimentador vizinho que tenha a maior reserva disponível. Se essa reserva for maior do que a demanda total da subárvore, fecha-se essa chave e o problema está resolvido.

-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. Isso significa que algumas chaves terão que ser abertas para isolar blocos que ficarão alimentados, evitando-se a formação de *loops* e mantendo-se a radialidade.

-se não houver uma ligação que resolva totalmente o problema, tenta-se resolver o problema envolvendo dois alimentadores vizinhos. Para isso, escolhe-se um par de ligações para vizinhos à subárvore. Supondo-se que essas duas chaves sejam fechadas, ter-se-á que abrir ao menos uma chave no meio da subárvore para manter a radialidade. Essa chave terá que estar em algum ponto do

caminho entre os dois nós que fazem a ligação com os vizinhos. Então, acha-se esse caminho e abre-se a primeira chave do mesmo. Tem-se, então, duas subárvores, cada uma ligada com um vizinho. Calcula-se a distribuição de carga para atender o máximo de cada subárvore. Em seguida, supõe-se que a segunda chave do caminho seja aberta ao invés da primeira, e repete-se o cálculo, e depois para a terceira, e assim por diante.

-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, para que se evite usá-las tanto quanto possível. Quanto menor for o valor de Z , melhor será a solução. 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: acha-se o caminho entre os três pontos de ligação, e abrem-se chaves nesse caminho (agora são duas chaves que devem ser abertas). Todas as possibilidades são testadas e as melhores opções são armazenadas.

-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. Quando não se acha uma solução satisfazendo totalmente a área desenergizada, todas as possibilidades testadas são apresentadas, mostrando-se as melhores opções de chaveamento encontradas.

-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.

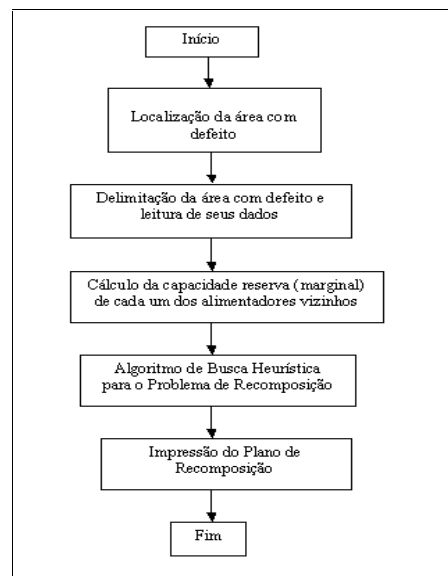


Figura 2 – Fluxograma do procedimento heurístico.

3. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

3.1. Exemplo Acadêmico

Considere a seguinte rede $R(E, V)$, sub-dividida em S^1 , S^2 e S^3 alimentadores. Os alimentadores estão interligados através de blocos de ligação que representam as chaves NA.

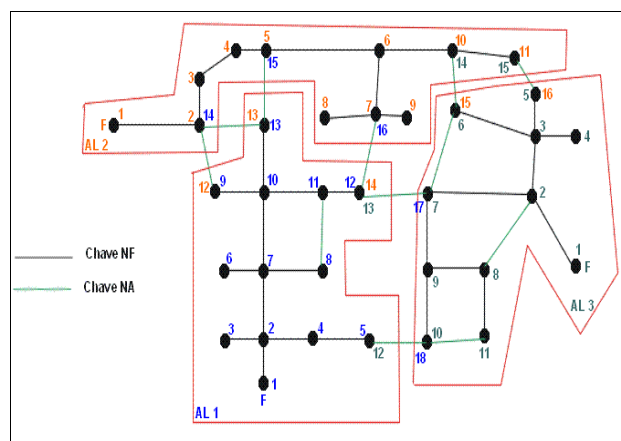


Figura 3 – Exemplo Acadêmico.

Os trechos possuem capacidades máximas a serem respeitadas como mostrado na Tabela 3 para o alimentador 1.

TABELA 3
DADOS DO ALIMENTADOR 1 .

Chave	Ident	C(I,j)	Estado	I_max	Tipo(i,j) Tronco/Ramal
[1,2]	1083	1	NF	400	T
[2,3]	1084	5	NF	150	R
[2,4]	1085	1	NF	400	T
[2,7]	1086	1	NF	400	T
[4,5]	1087	1	NF	400	T
[7,6]	1088	5	NF	150	R
[7,8]	1089	5	NF	150	R
[7,10]	1090	1	NF	400	T
[8,11]	1091	5	NA	150	R
[11,12]	1092	5	NF	150	R
[10,9]	1093	5	NF	150	R
[10,11]	1094	5	NF	150	R
[10,13]	1095	1	NF	400	T
[14,9]	1096	5	NA	150	A
[14,13]	1097	1	NA	400	A
[15,13]	1098	1	NA	400	A
[16,12]	1099	5	NA	150	A
[17,12]	1100	5	NA	150	A
[18,5]	1101	1	NA	400	A

Um defeito será gerado para o bloco 2 do alimentador 1 conforme mostrado na figura 3.

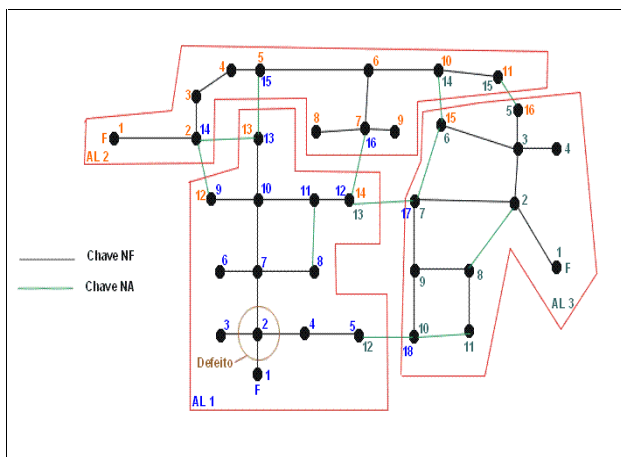


Figura 4 –Diagrama mostrando defeito no bloco 2.

Considerando o peso para minimizar o tempo e as cargas como sendo o mesmo ($\alpha=1$ e $\beta=1$) e utilizando os dois métodos anteriormente propostos obtém-se a sequência de manobras usada na tentativa de restabelecer o sistema. Pode-se ver na figura 4 o resultado.

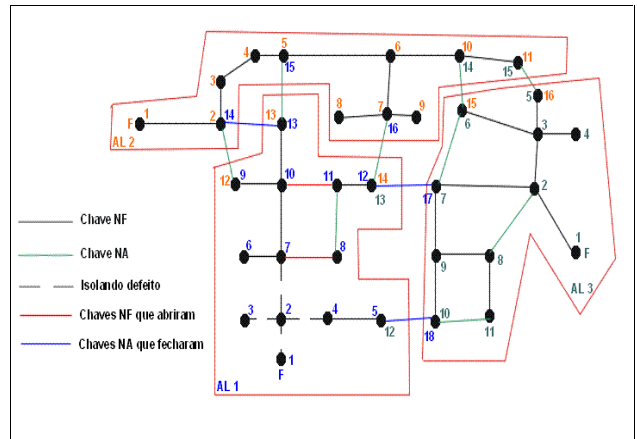


Figura 5 – Resultado após procedimentos.

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.

3.2. Exemplo de uma rede real.

Geralmente redes pequenas acabam servindo apenas para conclusões acadêmicas sobre a utilização de algoritmos. Utilizou-se uma rede com 08 alimentadores e duas subestações em região urbana e com densidade média de consumidores, formando aproximadamente 400 nós após a simplificação.

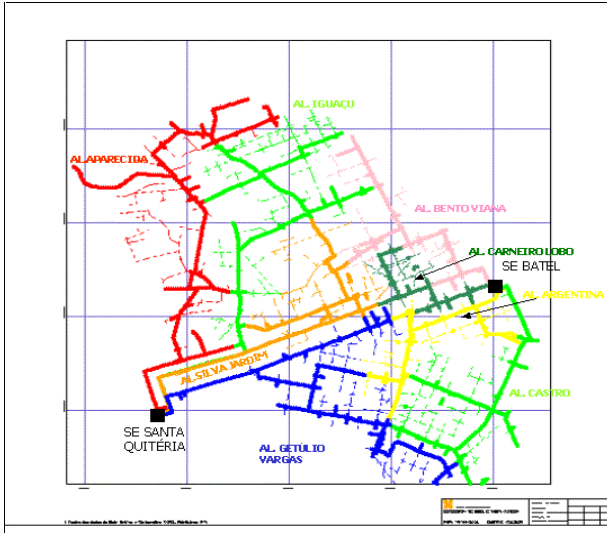


Figura 6 – Exemplo Real.

Para esta rede foram simulados diversos defeitos em alimentadores verificando a eficácia dos métodos já descritos. Foram variados também os valores de α e β para verificar possíveis mudanças nos resultados. Alguns dos casos simulados estão mostrados na tabela 4.

TABELA 4
RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES.

Al.	Pesos	Bloco com Defeito	Chaves usadas	Tempo (seg)	Carga não atendida.
1	$\alpha=1$	2	Nx=3 Ny=4	56	0%
	$\beta=0$				
1	$\alpha=1$	2	Nx=3 Ny=4	6	0%
	$\beta=1$				
1	$\alpha=1$	19	Nx=4 Ny=1	14	27%
	$\beta=0$				
1	$\alpha=1$	19	Nx=4 Ny=1	14	27%
	$\beta=1$				
5	$\alpha=1$	2	Nx=2 Ny=3	7	0%
	$\beta=0$				
5	$\alpha=1$	2	Nx=2 Ny=3	7	0%
	$\beta=1$				

Simulação em Pentium IV 2.0 GHz.

4. 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 complexos 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).

Em casos de redes de tamanho pequeno os dois métodos mostraram-se rápidos e bastante parecidos na solução. Nos casos de redes de tamanho real percebe-se algumas diferenças entre qualidade e tempo de resposta quando os alimentadores estão próximos do limite de seu carregamento ou existem poucas opções de manobra. Nestes casos o procedimento heurístico leva a uma resposta mais rápida.

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

5. AGRADECIMENTOS

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.

6. 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.