

Roteamento Ótimo de Alimentadores

A. Bianchi Jr.¹ e R. F. Marques

Resumo— Neste trabalho, um método para o planejamento ótimo, dimensionamento e roteamento de redes radiais primárias e o correspondente algoritmo são apresentados. O projeto ótimo da rede é encontrado pela minimização do custo total dos alimentadores radiais para um período de N anos, sobre o qual as localizações e características de carga são conhecidas. O método pode ser aplicado em outros tipos de redes. A principal vantagem do algoritmo desenvolvido sobre outros previamente publicados é que todos os parâmetros de custo e restrições técnicas e físicas são levadas em consideração.

Palavras-chave— análise financeira, *branch-and-bound*, planejamento ótimo, programação dinâmica, roteamento.

I. INTRODUÇÃO

Neste trabalho, um método para o planejamento ótimo, dimensionamento e roteamento de redes radiais primárias e o correspondente algoritmo são apresentados. O projeto ótimo da rede é encontrado pela minimização do custo total dos alimentadores radiais para um período de N anos, sobre o qual as localizações e características de carga são conhecidas. O método pode ser aplicado em outros tipos de redes.

A principal vantagem do algoritmo desenvolvido sobre outros previamente publicados é que todos os parâmetros de custo e restrições técnicas e físicas são levadas em consideração.

II. METODOLOGIA

O método proposto de otimizar o roteamento de alimentador é baseado na programação dinâmica (PD). Em termos de terminologia da PD, os seguintes elementos básicos do modelo do alimentador são definidos:

- **Propriedade Markoviana (Princípio de Otimalidade):** Em programação dinâmica, dado um estado corrente S_k , uma política para os estágios seguintes deve ser independente dos estágios anteriores. No caso do problema do roteamento em uma rede radial, este pré-requisito é satisfeito pela especificação que um nó deve alimentar uma carga específica. Assim, a modelagem do problema de roteamento deve ser baseada neste princípio, no sentido da propriedade Markoviana ser válida.
- **Estágio k :** Um estágio é definido como um subconjunto da rede de nós do SIG. A grade de nós do SIG é dividida em um número de estágios. Os nós de cada estágio,

M_k , são perimetricamente arranjados em volta da subestação. A distribuição dos nós em estágios é geralmente arbitrária, mas as seguintes regras devem ser seguidas:

- A enumeração dos estágios inicia-se do nó da subestação de AT/MT para os nós das cargas mais remotas. O primeiro estágio (zero) contém apenas o nó da subestação de AT/MT, enquanto o último nó (n) contém aquele com as cargas geograficamente mais distantes da subestação.
- Cada nó pertence a um único estágio.
- Cada nó do estágio k é geograficamente mais próximo da subestação de AT/MT que qualquer nó do estágio $k + 1$.

- **Estado S_k :** O estado S_k em um estágio k é definido como um subconjunto de nós do estágio, os quais alimentam todas as cargas dos estágios $k, k + 1, \dots, n$ em um específico caminho. Cada subconjunto inclui M_{ki} nós ($M_{ki} \leq M_k$). O número de subconjuntos é igual ao às possíveis combinações de M_k por 1, por 2, ..., por M_k , sendo igual a $2^{M_k} - 1$. Em cada combinação, o subconjunto de M_{ki} nós alimenta as L_{kn} cargas dos estágios k até n . O número de arranjos de alimentadores é $M_{ki}^{L_{kn}}$. Cada uma dessas combinações é um estado S_k . Deste modo, embora todos os estados S_k do estágio k alimentem as mesmas cargas, a distribuição de cargas entre os nós é diferente para cada estado. A alimentação das cargas do sistema por um nó pode ser feita diretamente ou através de nós do mesmo estágio ou de outros estágios. Entretanto, apenas cargas no mesmo estágio k são alimentadas diretamente dos nós do estágio. Dentro de cada estado S_k , uma otimização local é feita com respeito à conexão das cargas do estágio k aos nós do estado S_k . “Alimentar” as cargas do sistema por um nó pode ser feito diretamente ou através de outros nós do mesmo ou de outros estágios. Entretanto, apenas as cargas no mesmo estágio k são alimentadas diretamente pelos nós do estágio. É também notado que dentro de cada estado S_k , uma “otimização local” é feita com respeito às cargas do estágio k aos nós do estado S_k .

- **Decisão X_k :** Em programação dinâmica, é definida como a seleção do caminho de um estado do estágio k para outro estado no estágio $k + 1$. No problema de roteamento, ir de um estado S_k para um estado S_{k+1} é equivalente a conectar os nós destes dois estados. Usando este princípio, a conexão dos nós de dois estados é única. Dado que mais de um nó do estágio k pode alimentar o nó do estágio $k + 1$, a restrição de radialidade da rede pode ser violada. Conseqüentemente, uma decisão é caracterizada co-

¹ Alberto Bianchi Jr. é Professor Doutor do Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas da Escola Politécnica da USP (PEA/EPUSP)

mo “factível” quando cada nó do estágio $k + 1$ é conectado a apenas um nó do estágio k .

• *Função-objetivo, Z*: O custo da decisão X_k , iesto é, o custo de ir de um estado S_k para um estado S_{k+1} no próximo estágio, é calculado por:

$$Z_k(S_k, X_k) = [\text{custos de conexão}] + [\text{custos de potência transmitida}] +$$

$$[\text{custos de confiabilidade}] + [\text{custos de restrições}]$$

onde:

Custos de conexão: são os custos de construção das linhas requeridas para interconectar os nós dos estados S_k e S_{k+1} , bem como, os custos para a conexão das cargas do estágio k , para todo o período de estudo.

Custos de potência transmitida: são os custos de perdas associadas com a decisão X_k .

Confiabilidade: são os custos da energia não distribuída associadas com a decisão X_k .

Custos de restrições: são custos virtuais introduzidos no sentido de excluir (penalizar) decisões que violam as restrições operativas ou outras. São as seguintes:

✓ “Radialidade”, f_1 , é um custo obrigatório que deve ser levado em conta, ele expressa a “factibilidade” de uma decisão. Se um nó do estado S_{k+1} é conectado a apenas um nó do estado S_k , então $f_1 = 0$, senão, $f_1 = \infty$. Neste caminho, a formação de malhas é evitada;

✓ “Máximo comprimento de uma linha”, f_2 , prevê a conexão de nós não-vizinhos e pode ser operacionalmente levado em conta. Se cada nó do estado S_{k+1} é conectado com um nó vizinho do estado S_k , então $f_2 = 0$, senão, $f_2 = \infty$. O custo de “máximo comprimento de linha” está em concordância com a filosofia de pequenos movimentos entre nós, que é levada como uma regra do problema. Um valor razoável de “máximo comprimento de linha é $\sqrt{2}D$, onde D é a distância entre dois nós sucessivos;

✓ “Outros custos”, f_3 , podem ser introduzidos para levar em conta condições que podem existir para a conexão de um nó aos seus vizinhos, isto é, um alto custo de cabo subterrâneo, por exemplo. Obstáculos podem ser considerados, associando-se infinito valor a f_3 . A restrição de é definida pela soma $f_1 + f_2 + f_3$.

• *Política P_k e custo da política C_k (relação recursiva)*: Uma política P_k é definida como o conjunto de sucessivos estados (S_k, S_{k+1}, \dots, S_n), do estágio k ao último estágio n , relacionada com as correspondentes decisões X_k, X_{k+1}, \dots, X_n . O custo da política C_k é o corresponde custo definido como:

$$C_k = \sum_{i=k}^n [Z_i(S_i, X_i)] + V_k(P_k) \quad (1)$$

onde:

$Z_i(S_i, X_i)$ = custo da decisão X_i para a transição do estado S_i (do estágio i) para o estado S_{i+1} (do estágio $i + 1$)

V_k = custo virtual atribuído à queda de tensão na rede.

Especialmente para a política P_0 , custos adicionais podem ser adicionados ao correspondente custo C_0 , tal como custo da saída do alimentador da SE.

Se a política P_k é aplicada, então todos os estados S_k a S_n são conhecidos e, deste modo, uma correspondente rede é formada e a máxima queda de tensão ΔV_k nesta rede pode ser calculada. O correspondente custo para ΔV_k é 0, se $|\Delta V_k| < \Delta V_{lim}$, e ∞ , caso contrário. ΔV_{lim} é o limite máximo permitido de queda de tensão.

Se a melhor política tem sido determinada para o estado S_{k+1} , então uma decisão X_k para a transição do estado S_k ao estado S_{k+1} determina a política P_k com um custo associado C_k . Minimizando C_k para todas as possíveis políticas P_k resulta na política ótima P_k^* para o estado S_k , com custo C_k^* .

III. RESULTADOS

A partir da metodologia apresentada, foi desenvolvido o software **ROTEAMENTO**, que efetua o roteamento ótimo de alimentadores de uma rede primária. Este software, a partir das localizações geográficas das cargas e da subestação, determina o traçado ótimo dos alimentadores, utilizando o processo de Programação Dinâmica, conforme descrito.

O software **ROTEAMENTO** foi desenvolvido em ambiente Delphi e possui as seguintes características básicas:

✓ Leitura dos dados da rede (cargas, subestações e nós de passagem), com suas respectivas coordenadas X-Y e cargas, a partir de um banco de dados conectado ao software via ODBC.

✓ Interface gráfica onde, ao longo de processo de otimização, são mostrados os trechos candidatos originados da pré-otimização (figura 1) e, ao final do processo, são mostrados os trechos otimizados com os respectivos cabos. Na figura 1, a subestação é indicada na cor verde, os pontos de carga na cor amarela e os pontos de passagem na cor preta. A figura 2 mostra o resultado final do processo de roteamento ótimo, com os respectivos condutores por trecho. Observa-se que foi utilizada uma função “condutor econômico” baseada em uma publicação de um estudo específico ora desenvolvido no intuito de tornar os cálculos funcionais. A função de custo linearizada, para o intuito específico de obter resultados do software foi:

$$C(S) = C_f + C_v * S \quad (2)$$

onde:

$C(S)$ = custo econômico unitário do condutor em função da carga, R\$/km;

S = carga transportada, MVA;

C_f = custo fixo, R\$ (valor obtido = R\$ 20.000,00);

C_v = custo variável em função da carga, num período de 10 anos, com taxa de crescimento de 4% ao ano, fator de carga de 0.4, taxa de retorno de 6% a.a.

e tensão nominal de 13.8 kV (valor obtido = R\$ 17.000,00).

Os parâmetros utilizados referem-se a uma característica média para um sistema de distribuição específico, entretanto, sugere-se que, na continuidade deste P&D, haja um estudo de condutor econômico para as redes de distribuição da ELEKTRO. A função condutor econômico é específica a cada rede e, respectivamente, a cada tipologia predominante de cargas supridas por um alimentador.

Os alimentadores utilizados nos cálculos são os seguintes:

- ✓ 2 AWG CAA
- ✓ 4 AWG CAA
- ✓ 1/0 AWG CAA
- ✓ 4/0 AWG CAA
- ✓ 336.4 MCM CAA
- ✓ 477 MCM CAA

✓ Migração dos resultados do processo de otimização para uma planilha MS-Excel, a partir de mecanismo de OLE, no intuito do planejador ter em mãos os dados registrados de cada estudo.

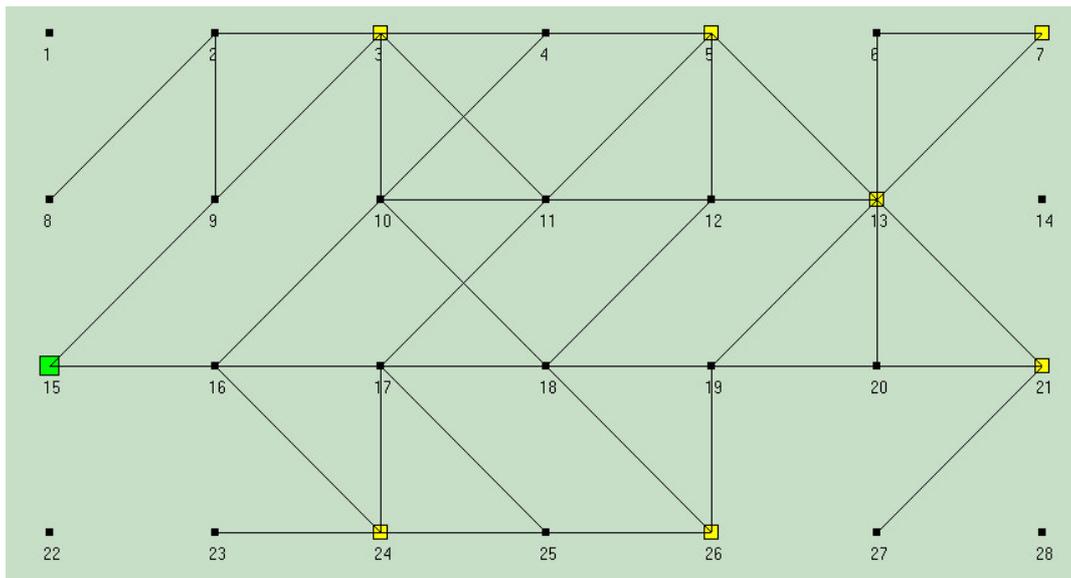


Figura 1

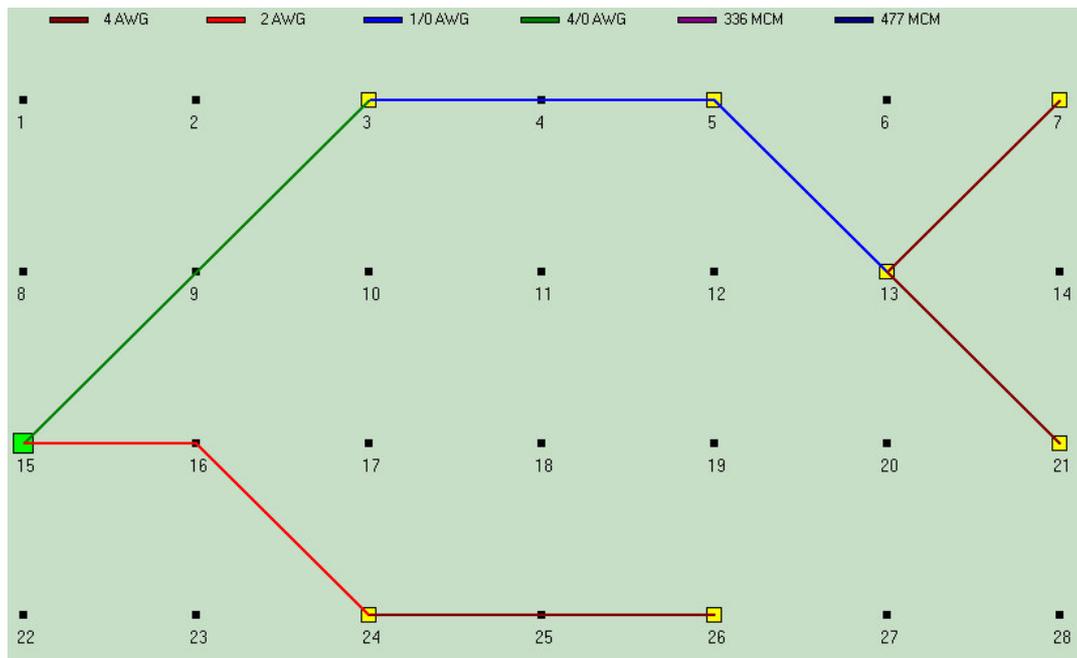


Figura 2

IV. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Periódicos:

- [1] P. M. S. Carvalho et al. . “*Distribution network expansion planning under uncertainty: a hedging algorithm in a evolutionary approach*” . IEEE Transactions on Power Delivery, vol 15, n. 1, p. 412-6, 2000
- [2] H. Kuwabara, K. Nara. “*Multi-year and multi-state distribution systems expansion planning by multi-branch exchange*” . IEEE Transactions on Power Delivery, vol 12, n. 1, p. 457-63, 1997
- [3] I. Tang . “*Power distribution system planning with reliability modeling and optimization*” . IEEE Transactions on Power Systems, vol 11, n. 1, p. 181-7, 1996
- [4] H. L. Willis et al. . “*Forecasting electric demand of distribution system planning in rural and sparsely populated regions*” . IEEE Transactions on Power Systems, vol 10, n. 4, p. 2008-13,1995
- [5] K. Nara et al. . *Distribution systems expansion planning by multi-stage branch exchange* . IEEE Transactions on Power Systems, vol 7, n. 1, p. 208-14,1992
- [6] I. J. Ramirez-Rosado, T. Gönen . “*Pseudodynamic planning for expansion of power distribution systems*” . IEEE Transactions on Power Systems, vol 6, n. 1, p. 245- 54, 1991

Livros:

- [1] J. J. Burk.”*Fundamentals of distribution engineering*”. Marcel Dekker, New York, 1994
- [2] H. L. Willis.” *Spacial electric load forecastin*”. Marcel Dekker, New Yor, 1996
- [3] F. S. Hillier, G.J. Lieberman. .“ *Introdução à pesquisa operacional*”. 1. ed., Tradução de Helena L. Lemos - Rio de Janeiro, São Paulo, Editora Campus/Editora da Universidade de São Paulo, 1988
- [4] P. A. Jensen, J.W. Barnes . “*Network flow programming*”. 1. ed., Austin, Texas, United States of America, John Wiley & Sons Inc, 1980

Dissertações e Teses:

- [1] A. Bianchi Jr., *Paradigma de Planejamento sob Incertezas - Aplicação ao Planejamento dos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica*, Tese de Doutorado, PEA/EPUSP, São Paulo/SP, 1996