

**O Impacto das Variações das Cargas ao Longo de um Dia sobre as Perdas em Sistemas de Distribuição**

**E. A. Bueno – UNICAMP, C. Lyra Filho – UNICAMP**

E-mail: [edilson@densis.fee.unicamp.br](mailto:edilson@densis.fee.unicamp.br) e [chrlyra@densis.fee.unicamp.br](mailto:chrlyra@densis.fee.unicamp.br)

**Palavras-chave** – Redução de Perdas, Variações de Demandas, Otimização de Problemas, Métodos Heurísticos.

**Resumo** - Este trabalho apresenta formulações matemáticas para o problema de redução de perdas em sistemas de distribuição de energia elétrica por reconfiguração de redes. Partindo-se de uma formulação para o problema onde as demandas são consideradas fixas, discute-se as simplificações normalmente utilizadas. Mostra-se, então, duas possíveis formulações para o problema que consideram as variações das demandas. Estudos de casos didáticos ilustram aspectos significativos do problema com demandas variáveis. Propõe-se também abordagens para o caso onde se impõe a restrição de que a rede (ou parte dela) não pode ter a configuração alterada ao longo de um período estudado.

## 1. INTRODUÇÃO

Em sistemas de energia elétrica, desde a transmissão até a distribuição, continuamente ocorrem dissipações de energia (perdas), devido à resistência elétrica nas linhas e equipamentos. As perdas são proporcionais às cargas que a rede alimenta e estas sofrem variações de intensidade e características ao longo do dia. No Brasil, as perdas são estimadas em 15 % da energia elétrica total produzida [3], chegando a atingir níveis acima de 8 % no sistema de distribuição.

A operação usual de um sistema de distribuição é da forma radial, ou seja, não se permitem anéis (ciclos). Os alimentadores, no entanto, são conectados a seus vizinhos através de chaves de interligação, normalmente abertas - essas chaves aumentam a confiabilidade do sistema, possibilitando alternativas para isolar falhas e religar áreas isoladas em decorrência de defeitos.

As chaves “normalmente abertas” podem também ser usadas para alterar o estado usual de operação das redes com o objetivo de reduzir perdas. Os primeiros autores a visualizarem o uso de procedimentos de reconfiguração de redes para reduções de perdas em sistemas de distribuição de energia elétrica foram os engenheiros franceses Merlin e Back, em 1975 [5]. Esses autores mostraram que as reduções de perdas por reconfiguração, além dos benefícios econômicos diretos, trazem outros aspectos positivos, tais como: obtenção de uma boa distribuição de cargas entre os alimentadores, adiamento da necessidade de investimentos em expansão das redes e maior robustez em relação a falhas (diante de

emergências, um pequeno número de chaveamentos pode restaurar o suprimento de energia a áreas escuras).

O número de configurações possíveis em uma rede de distribuição primária está associado ao número de combinações de estados das chaves, fator que cresce exponencialmente com o número de chaves existentes na rede. Esse fato faz com que, dentre as muitas abordagens para o problema de redução de perdas [7], as técnicas melhor sucedidas foram aquelas que trataram o problema com métodos aproximados. Entre estas, destacam-se os métodos de Abertura Sequencial de Chaves [8] e o de Troca de Ramos (*branch-exchange*) [4].

A grande maioria dos trabalhos sobre o problema de redução de perdas no sistema de distribuição de energia elétrica faz abordagens para demandas fixas. No entanto, alguns trabalhos já visualizaram benefícios em abordar o problema levando em consideração as variações de carga ao longo de determinado período de tempo [6], [9] e [10]. Embora as melhores oportunidades de redução de perdas nos sistemas de distribuição ocorram quando os sistemas modificam as configurações, através de chaveamentos, para se adequar às variações nos perfis de demanda, essas operações precisam ser realizadas com prudência. Chaveamentos podem ser considerados operações de risco, em decorrência das perturbações transitórias na rede. Este fato faz com que, geralmente, os Centros de Operação de Distribuição (COD's) sejam reticentes em relação a reconfigurações ao longo do dia.

Este trabalho tem o objetivo de estudar o impacto das variações das cargas ao longo do dia sobre as reduções de perdas. Sua principal contribuição é a análise minuciosa do problema de redução de perdas com demandas variáveis, aliada a proposta de alternativas de compromisso adequado entre redução de perdas e riscos de manobras.

O próximo item apresenta a caracterização do problema e sua formulação matemática, com demandas fixas e demandas variáveis. A Seção 3 apresenta estudos de casos didáticos para o problema. A Seção 4 apresenta uma proposta de abordagem para o problema com demandas variáveis, por Heurística de Menor Energia. A Seção 5 apresenta uma segunda proposta de abordagem, Troca de Ramos Generalizada. Discussões e perspectivas para trabalhos futuros finalizam o artigo.

## 2. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

A Fig. 1 apresenta um diagrama simplificado de uma rede de distribuição primária de energia elétrica, destacando as entidades mais relevantes para o problema de redução de perdas. São elas: subestações (SE), linhas elétricas (L), chaves (CH) e os consumidores agrupados em Blocos de Carga (BC). As chaves podem ser seccionadores simples ou disjuntores.

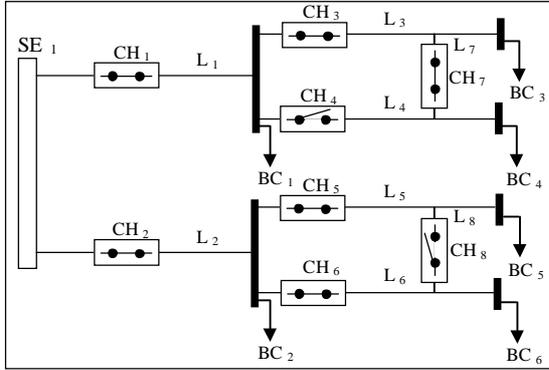


Figura 1: Rede de Distribuição de Energia Elétrica.

Modela-se a rede de distribuição através de uma estrutura de grafos  $G = [\mathcal{N}, \mathcal{A}]$ , onde  $\mathcal{N}$  representa o conjunto de nós e  $\mathcal{A}$  é o conjunto de arcos [1]. A Fig. 2 apresenta uma representação por grafo da rede de distribuição primária da Fig. 1.

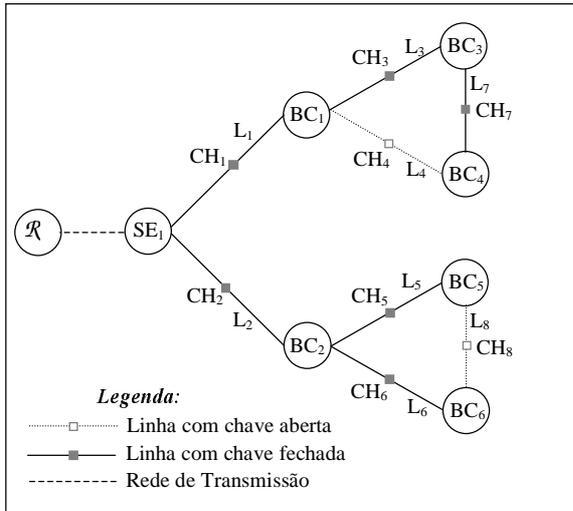


Figura 2: Representação da Rede de Distribuição em Grafo.

Os nós estão associados a blocos de carga ou subestações (um nó raiz,  $\mathcal{R}$ , é também incluído para evitar dificuldades no tratamento de conectividade da rede). Os arcos estão associados a linhas ou a chaves - os arcos que conectam as subestações ao nó raiz podem ser identificados como a rede de transmissão.

### 2.1. Cálculo dos Fluxos

A Fig. 3 apresenta um alimentador de uma rede de distribuição de energia elétrica com  $N$  barras (nós) e  $a$  ramos (arcos).

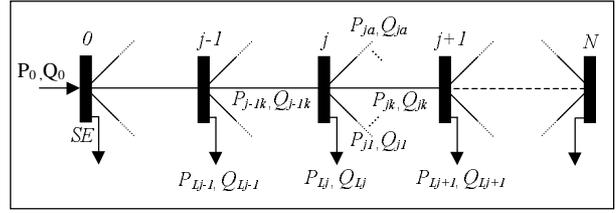


Figura 3: Alimentador de uma Rede de Distribuição.

Para se determinar os fluxos de potência numa rede de distribuição de energia elétrica, pode-se utilizar as equações de fluxo de potência para redes radiais [2], como está representado nas Equações (1). Supõe-se conhecida as cargas ativas e reativas em todos os barramentos, e as tensões nas subestações.

$$P_{j+1} = \sum_{k=1}^a P_{jk} - r_{jk} \frac{(P'_{jk})^2 + (Q'_{jk})^2}{V_{jk}^2} - P_{Lj+1} \quad (1a)$$

$$Q_{j+1} = \sum_{k=1}^a Q_{jk} - x_{jk} \frac{(P'_{jk})^2 + (Q'_{jk})^2}{V_{jk}^2} - Q_{Lj+1} \quad (1b)$$

$$V_{j+1}^2 = \sum_{k=1}^a V_{jk}^2 - 2(r_{jk}P'_{jk} + x_{jk}Q'_{jk}) + (r_{jk}^2 + x_{jk}^2) \frac{(P'_{jk})^2 + (Q'_{jk})^2}{V_{jk}^2} \quad (1c)$$

$$P'_{jk} = P_{jk} + P_{Lj} \quad e \quad Q'_{jk} = Q_{jk} + Q_{Lj} \quad (1d)$$

Onde: -  $j$  são as barras (nós) do sistema;

-  $k$  são os ramos (arcos) do sistema;

-  $a$  é o número total de ramos que sai da barra  $j$ ;

-  $N$  é o número total de barras (nós) na rede;

-  $P_{jk}$  é a potência ativa no ramo  $k$  que sai da barra  $j$ ;

-  $P_{Lj}$  é a potência ativa consumida pela carga na barra  $j$ ;

-  $Q_{jk}$  é a potência reativa no ramo  $k$  que sai da barra  $j$ ;

-  $Q_{Lj}$  é a potência reativa consumida pela carga na barra  $j$ ;

-  $V_j$  é a amplitude da tensão na barra  $j$ ;

-  $r_{jk}$  é a resistência no ramo  $k$  que sai da barra  $j$ ;

-  $x_{jk}$  é a reatância indutiva no ramo  $k$  que sai da barra  $j$ ;

Observa-se que os termos quadráticos, que representam as perdas nos ramos, são muito menores que os fluxos nos arcos,  $P_{jk}$  e  $Q_{jk}$ . Portanto, é usual simplificar-se as equações, desprezando-os [2]. O conjunto de Equações (2) apresenta as equações simplificadas para o cálculo do fluxo de potência.

$$P_{j+1} = \sum_{k=1}^a P_{jk} - P_{Lj} \quad (2a)$$

$$Q_{j+1} = \sum_{k=1}^a Q_{jk} - Q_{Lj} \quad (2b)$$

$$V_{j+1}^2 = \sum_{k=1}^a V_{jk}^2 - 2(r_{jk}P_{jk} + x_{jk}Q_{jk}) \quad (2c)$$

### 2.2. Formulação para Demanda Fixa

As perdas elétricas (potência dissipada) nas linhas são proporcionais ao quadrado das correntes. Pode-se expressá-las em termos dos fluxos de potências ativas e

reativas nos arcos da rede [2]. Usando esta caracterização, as perdas totais na rede são definidas pela função  $f(P, Q)$ , conforme apresenta a Equação (3).

$$f(P, Q) = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^a r_{jk} \frac{(P_{jk}^2 + Q_{jk}^2)}{V_j^2} \quad (3)$$

O problema de minimização de perdas através de reconfigurações para um conjunto de demandas conhecidas (em um determinado momento), pode ser caracterizado na forma a seguir.

$$\text{Min}_{C_v} f(P, Q)$$

- S.a.: - Equações (2);  
 - Restrições de fluxos máximos;  
 - Restrições sobre as amplitudes das tensões;  
 - Operação radial da rede.

A solução do problema deve indicar os arcos (chaves) que ficarão abertos, para manter a estrutura em árvore (radialidade) da rede. O vetor de arcos  $C_v$ , com a dimensão do número de arcos da rede, é formado por componentes binários, sendo 0 para as chaves abertas e 1 para as chaves fechadas. Cabe lembrar que nem todos os arcos são chaves - os arcos que não representam chaves apresentam no vetor  $C_v$  elementos sempre fixos em 1.

### 2.2.1. Simplificações do Problema

Como a amplitude das tensões nos ramos da rede de distribuição, em p.u., são aproximadamente unitárias, é usual adotar-se a simplificação de supor  $V_j \approx 1$  p. u. [2]. Com essa simplificação, a Equação (2c) torna-se desnecessária.

A nova função objetivo do problema ficará como descrito na Equação (4).

$$f(P, Q) = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^a r_{jk} (P_{jk}^2 + Q_{jk}^2) \quad (4)$$

Quando as cargas são bem compensadas, as potências reativas podem ser consideradas aproximadamente proporcionais as potências ativas. Ou seja,  $(Q_j \approx \lambda * P_j \forall j)$ . Sob esta hipótese, observa-se que as Equações de fluxos (2a) e (2b) são equivalentes. Utilizando-se a mesma propriedade na função objetivo, representada pela Equação (4), obtém-se a expressão a seguir.

$$f(P, Q) = (1 + \lambda^2) \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^a r_{jk} P_{jk}^2 \quad (5)$$

O termo  $(1 + \lambda^2)$  não altera o resultado da otimização. Ele deve ser considerado apenas para o cálculo das perdas, após a solução do problema.

Em resumo, considerando-se as simplificações apresentadas, o problema de minimização de perdas elétricas em redes de distribuição de energia para uma situação de demandas fixas (e conhecidas), pode ser expresso por  $P_{df}$ .

$$P_{df} \left\{ \begin{array}{l} \text{Min}_{C_v} \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^a r_{jk} P_{jk}^2 \\ \text{S.a.: } A.C.P = b \\ \underline{P} \leq P \leq \overline{P} \\ G' = [\mathcal{N}, \mathcal{A}'] \text{ é uma árvore} \end{array} \right.$$

Onde: -  $A$  representa a matriz de incidência nó-arco do grafo que representa o sistema de distribuição;

-  $C$  é a matriz quadrada e diagonal (isto é, todos os elementos fora da diagonal são nulos) - sua diagonal é o vetor de estado das chaves do sistema ( $C_v$ );

-  $P$  representa o vetor dos fluxos de potência;

-  $b$  representa o vetor de carga nos nós ou potência injetada no nó origem;

-  $\overline{P}$  e  $\underline{P}$  representam os limitantes para os fluxos que circulam na rede, estabelecidos pela capacidade dos condutores;

-  $\mathcal{A}'$  é o conjunto de arcos com fluxos diferentes de zero (correspondentes às chaves fechadas).

Supõe-se que a injeção de potência na rede é igual a potência necessária para abastecer todas as cargas nos nós, ou seja,  $\sum_{j \in N} b_j = 0$  ( $b_j$  são componentes do vetor  $b$ ).

### 2.3. Formulação para Demanda Variável

Quando as cargas sofrem grandes variações de intensidade e características ao longo do dia, uma configuração “ótima” para o pico da curva de carga muito provavelmente não será mais “ótima” para o horário de menores demandas.

A curva de carga pode ser dividida em  $T$  intervalos, cada um de tamanho  $\Delta t$ . A Equação (6) apresenta a função de perdas de energia totais para todo o período estudado,  $f(P, Q, T)$ .

$$f(P, Q, T) = \Delta_1 \left( \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^a r_{jk} P_{jk1}^2 \right) + \Delta_2 \left( \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^a r_{jk} P_{jk2}^2 \right) + \dots + \Delta_i \left( \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^a r_{jk} P_{jki}^2 \right) \quad (6)$$

Onde  $\Delta_i$  é a duração do  $i$ -ésimo intervalo de tempo e  $P_{jki}$  é a potência ativa no ramo  $k$  que sai da barra  $j$ , durante o intervalo  $i$ ;

O problema de minimização de perdas elétricas em redes de distribuição de energia, considerando as variações de demandas, pode ser expresso por  $P_{dv}$ .

$$P_{dv} \left\{ \begin{array}{l} \text{Min}_{C_v} \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^a \Delta_i (r_{jk} P_{jki}^2) \\ \text{S.a.: } A.C_i.P_i = b_i \\ \underline{P}_i \leq P_i \leq \overline{P}_i \\ G'_i = [\mathcal{N}, \mathcal{A}'_i] \text{ é uma árvore} \end{array} \right\} \quad i = 1, 2, \dots, T$$

Onde  $T$  é o número de intervalos de tempo considerados e  $\mathcal{A}'_i$  é o conjunto de arcos com fluxos diferentes de zero (chaves fechadas), no intervalo  $i$ .

Tratar o problema de redução de perdas em sistemas de distribuição de energia elétrica, da forma como está apresentado o problema  $P_{dv}$ , é equivalente a resolver vários problemas desacoplados, um para cada intervalo de tempo.

## 2.4. Formulação para Demanda Variável e Configuração Fixa

Em situações onde não se deseja modificar configurações para uma melhor adequação a cada intervalo de período de estudos, é necessário impor a restrição de configuração fixa ao longo do período estudado. Tem-se o problema  $P_{dva}$ , a seguir.

$$P_{dva} \left\{ \begin{array}{l} \text{Min}_{C_v} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^a \Delta_i (r_{jk} P_{jki}^2) \\ \text{S.a: } AC_i \cdot P_i = b_i \\ \underline{P}_i \leq P_i \leq \bar{P}_i \\ \mathcal{G}' = [\mathcal{N}, \vec{A}'] \text{ é uma árvore} \end{array} \right\} \quad i = 1, 2, \dots, T$$

Onde  $\vec{A}'$  é conjunto de arcos com fluxos diferentes de zero (chaves fechadas) em todos os intervalos de tempo.

Pode-se observar que a diferença entre as formulações dos problemas  $P_{dv}$  e  $P_{dva}$  é sutil. No entanto, sob esta pequena nuance de formulação esconde-se um aumento de complexidade significativo. De fato, o problema  $P_{dva}$  ainda não havia sido abordado, ou mesmo formulado, na literatura da área.

Neste trabalho apresenta-se duas propostas de abordagem para o problema  $P_{dva}$ : - a primeira denominada “Heurística da Menor Energia”, inspirada no algoritmo de “Abertura Sequencial de Chaves”, desenvolvido por Merlin e Back [5]; - a segunda é denominada “Troca de Ramos Generalizada”, inspirada no algoritmo “Troca de Ramos” de Baran e Wu [2]. Esses métodos serão discutidos nas Seções 4 e 5.

A próxima Seção ilustra aspectos do problema através de exemplos didáticos.

## 3. ESTUDO DE CASO DIDÁTICO

Criou-se, para os estudos de casos, uma rede de distribuição fictícia com 9 nós e 11 arcos, apresentada na Fig. 4. Supõe-se todos os arcos com resistência de 1 ohm. Esta pequena rede permite a construção de exemplos didáticos, com o objetivo de se observar o comportamento das perdas quando se varia sensivelmente a demanda.

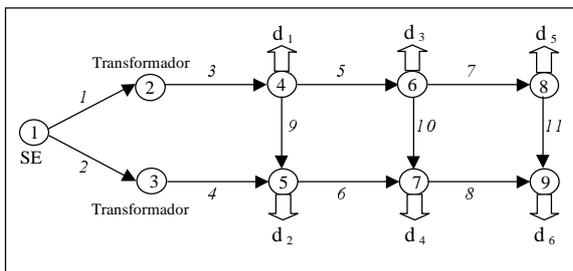


Figura 4: Rede de Distribuição.

São adotados três patamares de cargas: baixa, média e alta. Supõe-se uma “carga baixa” com um valor total de 12 kW e duração de 8 horas; uma “carga média” com valor total de 24 kW e duração de 10 horas; uma “carga alta” com valor total de 36 kW e duração de 6 horas. Os consumos em cada bloco de carga ( $d_i$  na Fig. 4), para os três patamares de demanda, são mostrados na Tabela I.

TABELA I  
VALORES DAS DEMANDAS EM CADA BLOCO DE CONSUMO

	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$	$d_6$
Baixa (12 kW)	3,0	2,5	2,5	1,5	1,5	1,0
Média (24 kW)	4,0	2,5	12,0	2,0	2,0	1,5
Alta (36 kW)	22,0	3,0	4,0	2,5	2,5	2,0

É fácil verificar que as configurações radiais ótimas para as cargas baixa, média e alta são, respectivamente, as configurações 1, 2 e 3 apresentadas na Fig. 5.

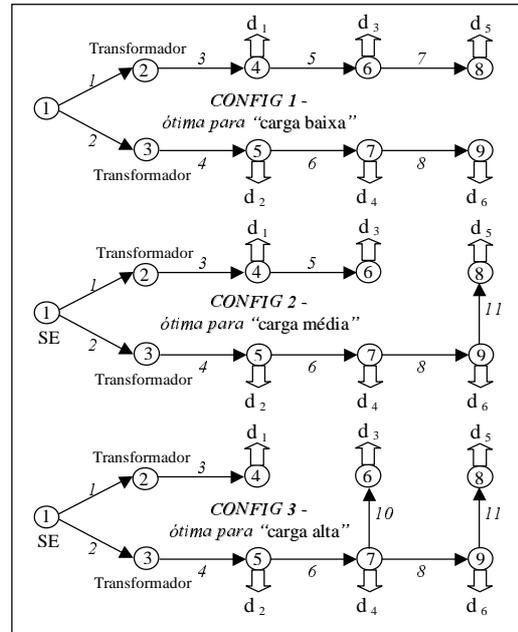


Figura 5: Configurações Ótimas.

A Tabela II apresenta as perdas em (kW) para as configurações radiais apresentadas na Fig. 5, em cada situação de carga. A última linha da tabela (*Perdas Ótimas*) apresenta os menores valores de perdas para cada situação de carga, supondo que a rede pode ser reconfigurada para se adequar às variações de demandas.

A penúltima coluna da Tabela II (*Total em 24 h*) apresenta o total das perdas na rede ao longo de um dia (em kWh); nas três primeiras linhas desta coluna considera-se que o sistema opera com a configuração (fixa) associada à linha. A última linha (da mesma coluna) informa as perdas ao longo de um dia, na situação onde a rede opera com a melhor configuração para cada perfil de carga.

A última coluna da Tabela II (*Acréscimo Percentual*) indica o acréscimo percentual nas perdas totais, quando se opera com a configuração fixa associada à linha. O acréscimo é calculado em relação às perdas totais ótimas em energia (apresentados na última linha) – alcançados quando a rede modifica a configuração para se adequar à carga.

TABELA II  
VALORES DAS PERDAS NAS CONFIGURAÇÕES ÓTIMAS

	Perdas				
	Baixa 8 h (kW)	Média 10 h (kW)	Alta 6 h (kW)	Total 24 h (kWh)	Acrésc. Perc. (%)
Config 1	99,5	640,5	941,3	12.848,5	11,3
Config 2	103,3	568,5	867,5	11.716,0	1,5
Config 3	147,0	984,5	843,5	16.082,0	39,3
Perdas Ót.	99,5	568,5	843,5	11.542,0	

A observação da Tabela II permite inferir alguns pontos para balizamento de alternativas sobre redução de perdas por reconfigurações:

1. Confirma-se que as melhores reduções de perdas são alcançadas quando as redes modificam as configurações para se adequarem às variações de carga;
2. Quando se impõe que as redes devem manter as configurações fixas, as melhores alternativas de operação não estarão necessariamente associadas à carga alta;
3. Podem existir situações onde a restrição de que as redes (ou parte delas) operam com configurações fixas não levem a um acréscimo significativo no total das perdas.

Analisando os resultados da última coluna da Tabela II, notamos que pequenas alterações nas configurações fixas das redes podem levar a reduções ou acréscimos significativos nas perdas. Por exemplo, a passagem da Configuração 2 para a Configuração 3, realizada com uma única troca de estados das chaves, acarreta em um acréscimo de quase 38 % nas perdas. Por isso, precisamos de métodos que sejam capazes de encontrar boas soluções para o problema  $P_{dva}$ , formulado neste artigo.

Para o exemplo estudado, se impuser a proibição de reconfigurações ao longo de um período, a Configuração 2 (melhor configuração de operação para cargas médias) corresponde a melhor alternativa para operação da rede.

No entanto, deve-se ressaltar que a melhor configuração fixa para operação ao longo de determinado período, pode não corresponder a uma das configurações ótimas de operação, obtida pela solução do problema para um determinado perfil de carga. Esta situação será ilustrada no exemplo a seguir.

Considera-se a mesma rede de distribuição apresentada na Fig. 4, com apenas dois perfis de carga, alta e baixa. Para simplificar o exemplo, supõe-se ambas as situações de carga com intervalo de duração de 12 horas.

Os consumos em cada nó serão os mesmos apresentados na Tabela I. A Fig. 6 apresenta as configurações ótimas para cada perfil.

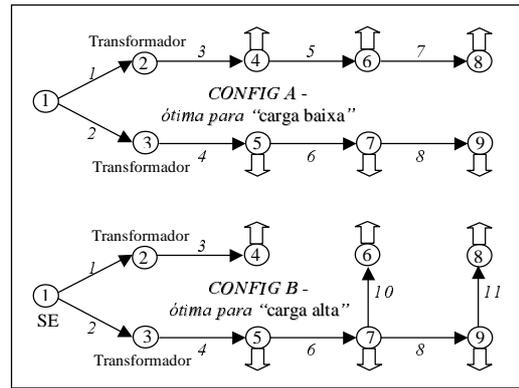


Figura 6: Configurações Ótimas para Cargas Baixa e Alta.

A Tabela III apresenta os valores das perdas para as duas situações de carga, em potência (kW) e em energia (kWh), com três intervalos diferentes de duração para cada carga. Apresenta-se também as perdas totais para operação ao longo de um dia (em kWh). Na última coluna, a configuração que apresenta os menores valores de perdas, ao longo de um dia em energia, é realçada.

TABELA III  
VALORES DAS PERDAS TOTAIS EM ENERGIA

	Perdas				
	Carga Baixa		Carga Alta		Total
	Potência (kW)	Energia (kWh)	Potência (kW)	Energia (kWh)	Energia (kWh)
Duração	12 horas		12 horas		24 horas
Config A	99,5	1194,0	941,3	11295,6	12489,6
Config B	147,0	1764,0	843,5	10122,0	11886,0

Uma outra configuração radial para a rede de distribuição é apresentada na Fig. 7. Esta rede não é a configuração com fluxos ótimos de potência para as cargas alta e baixa. A Tabela IV apresenta os valores das perdas em potência para esta rede, nas situações de carga alta e baixa. A tabela apresenta também, em destaque, os valores das perdas em energia ao longo de um dia.

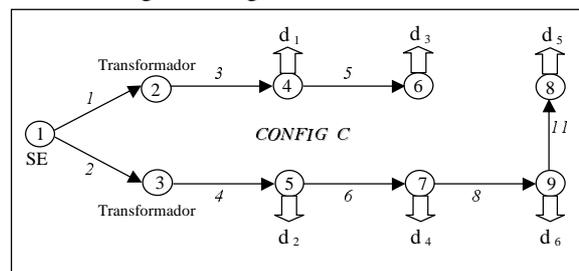


Figura 7: Uma Configuração Alternativa.

TABELA IV  
VALORES DAS PERDAS EM ENERGIA NA CONFIGURAÇÃO ALTERNATIVA

	Perdas				
	Carga Baixa		Carga Alta		Total
	Potência (kW)	Energia (kWh)	Potência (kW)	Energia (kWh)	Energia (kWh)
Duração	12 horas		12 horas		24 horas
Config C	103,3	1239,9	867,5	10410,0	11649,6

Observa-se a Configuração *C*, apresentada na Fig. 7, não é a melhor alternativa para a situação de carga alta, ou para carga baixa. No entanto, com a restrição de manter a configuração fixa ao longo de um dia, a Configuração *C*, é melhor que as configurações *A* ou *B*, em relação a redução de perdas.

As próximas Seções apresentam alternativas para abordagem do problema de se encontrar a melhor configuração fixa para operação ao longo de determinado período (problema  $P_{dva}$ ).

#### 4. HEURÍSTICA DA MENOR ENERGIA

Em seu trabalho pioneiro, Merlin e Back [5] propuseram o método de “Abertura Sequencial de Chaves” para o problema de redução de perdas com demandas fixas. Em linhas gerais, o método consiste na aplicação sucessiva de dois procedimentos, até a obtenção de uma solução radial. Resumidamente,

1. encontrar a melhor distribuição de fluxos para uma rede com anéis,
2. abrir a chave com menor fluxo de potência.

A Heurística da Menor Energia é uma extensão dessas idéias para abordagem do problema  $P_{dva}$ , onde as demandas são variáveis, mas a rede deve operar com configuração fixa. De forma simplificada, corresponde a seqüência de passos a seguir.

**Passo 01** Calcular os fluxos de potência ótimos para todas as situações de cargas, sem a restrição de radialidade;

**Passo 02** Transformar todos os fluxos calculados em energia, considerando os intervalos de duração das cargas;

**Passo 03** Calcular a energia total associada a cada arco durante o intervalo (a energia total associada a um certo arco é a soma das energias que fluem no mesmo, em cada um dos intervalos);

**Passo 04** Verificar se a rede ainda contém anéis com fluxos diferentes de zero em todos os arcos.  
 - *se sim*, retirar o arco (isto é, abrir a chave) pertencente ao anel com menor valor associado de energia e voltar ao **Passo 01**;  
 - *caso contrário*, PARAR e mostrar a solução encontrada.

##### 4.1. Aplicação do Algoritmo

Considera-se o primeiro exemplo da Seção anterior, com os três patamares de demanda e a duração dos intervalos apresentados nas Tabelas I e II.

A heurística da menor energia tem como ponto de partida uma rede com todas as chaves fechadas. Ou seja, utiliza-se como configuração inicial a rede de distribuição apresentada na Fig. 4, para a qual calcula-se os fluxos ótimos de potência.

O caminho do algoritmo foi o seguinte: abriu-se inicialmente a chave 11; a segunda chave a ser aberta foi a chave 09; a próxima chave aberta foi a 10, obtendo a rede radial, apresentada na Fig. 8.

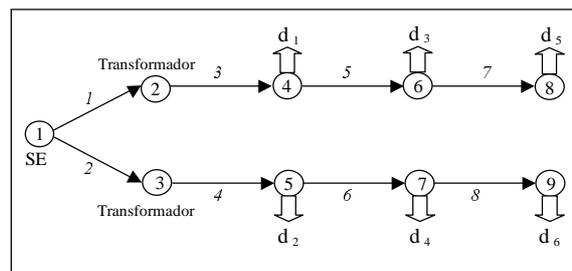


Figura 8: Rede Radial obtida pela Heurística da Menor Energia.

Comparando-se a rede obtida pela Heurística da Menor Energia com os resultados apresentados pela Tabela 2, nota-se que com apenas uma troca de estados entre duas chaves pode-se conseguir reduções adicionais de perdas. Por exemplo, ao trocar-se os estados das chaves 7 e 11, consegue-se uma redução nas perdas de quase 10 %. Esta observação foi a motivação para o desenvolvimento de uma metodologia de Troca de Ramos, levando-se em conta a energia na rede; tema da próxima Seção.

#### 5. TROCA DE RAMOS GENERALIZADA

O método de troca de ramos (branch-exchange) proposto inicialmente por Civanlar e co-autores [4] é um procedimento que parte de uma configuração de operação radial e, através de trocas de ramos, modifica as configurações na tentativa de reduzir as perdas resistivas, sem perder a radialidade da rede. No método original as demandas são fixas.

Civanlar e co-autores apresentaram algumas condições para se identificar na rede troca de ramos atraentes. As condições podem ser resumidas em dois pontos:

1. há possibilidades de redução de perdas se houver uma diferença de tensão significativa entre os terminais (nós) de uma chave aberta;
2. a redução de perdas é alcançada com a transferência de cargas do terminal de tensão mais baixa para o terminal de tensão mais alta.

Essas idéias também permitem generalizações do método troca de ramos original para abordagem do problema  $P_{dva}$ . A generalização do método original corresponde a consideração das perdas em energia ao longo do período. De forma simplificada, o algoritmo corresponde à seqüência de passos a seguir.

**Passo 01** A partir de uma configuração de operação radial da rede de distribuição, calcula-se, para todas as situações de carga, os valores das tensões para os nós correspondentes às extremidades de chaves abertas;

**Passo 02** Se não existirem chaves com quedas de tensões significativas entre seus terminais, PARAR - o processo de Troca de Chaves está concluído;

**Passo 03** Para cada chave aberta, em todos os perfis de carga, que apresentar um diferença de tensão significativa em seus terminais, fazer:

- Calcular, para todos os perfis de carga, a diferença de tensão nos terminais;

- Multiplicar o valor da diferença de tensão pela duração do intervalo de cada perfil, para todos os perfis de carga;
- Calcular a *diferença de potencial ampliada*, correspondente a somatória do produto “diferença de tensão” x “duração do intervalo” para todos os perfis;

**Passo 04** Fechar a chave que apresentar a maior *diferença de potencial ampliada* e identificar o ciclo formado na rede;

- Partindo-se do terminal (nó) com maior diferença de potencial, percorrer o ciclo e encontrar a chave cuja abertura proporcionará a maior redução de perdas em energia;

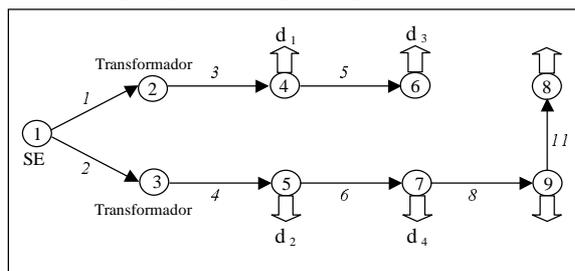
**Passo 05** Voltar a configuração radial, abrindo a chave do ciclo que proporcione a maior redução de perdas em energia na rede;

**Passo 04** Atualizar os valores das tensões e voltar ao **Passo 02**.

### 5.1. Aplicação do Algoritmo

O algoritmo de troca de ramos tem como ponto de partida uma rede sem ciclos. Pode-se aplicar o algoritmo à rede radial apresentada na Fig. 6, (obtida pela Heurística da Menor Energia).

Inicialmente o algoritmo sugeriu o fechamento da chave 10; no entanto, percorrendo-se o ciclo, nenhuma abertura de chave proporcionava reduções nas perdas. Seguindo-se o algoritmo, a próxima sugestão foi o fechamento da chave 9, mais uma vez, ao percorrer-se o ciclo, nenhuma abertura de chave proporcionava reduções nas perdas. Em seguida, sugeriu que a chave 11 deveria ser fechada. Desta vez, percorrendo-se o ciclo, verificou-se que a abertura da chave 7 proporcionaria reduções nas perdas. A Fig. 9 apresenta a rede obtida, após a troca de chaves; esta é a configuração ótima para o problema.



**Figura 9:** Rede de Distribuição obtida pela Troca de Ramos Generalizada.

## 6. CONCLUSÕES

O trabalho traz uma contribuição para o problema de redução de perdas técnicas por reconfigurações na distribuição de energia elétrica. Especificamente, aborda situações onde as demandas são variáveis.

Desenvolveu-se formulações matemáticas para o problema, considerando-se graus de liberdade distintos em relação à operação da rede. Na situação de maior liberdade, as redes podem ser reconfiguradas livremente para se adequarem às variações de demanda. No caso

mais restrito, e difícil, as redes devem operar com configuração fixa; a análise detalhada deste caso é a principal contribuição do trabalho.

As formulações matemáticas foram simplificadas para realçar as características mais importantes do problema. Numa mesma direção, desenvolveu-se estudos de casos didáticos com objetivos de ilustrar a diversidade de aspectos do tema estudado.

Os estudos de casos mostraram a importância de desenvolvimentos de métodos que levem a boas soluções do problema com demandas variáveis e configurações fixas. A “heurística da menor energia” e a “Troca de Ramos Generalizada” apresentadas nas Seções 4 e 5, são propostas nessa direção.

## 7. AGRADECIMENTO

Este trabalho foi realizado com o apoio do CNPq, entidade do Governo Brasileiro voltada ao desenvolvimento científico e tecnológico. Os autores expressam seus agradecimentos.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ahuja, R. K.; Magnanti, T. L. and Orlin, J. B. “Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications”. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ. 1993.
- [2] Baran, M. and Wu, F. “Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing”. IEEE. 1989.
- [3] Cavellucci, C. “Buscas Informadas baseadas em Grafos para a Minimização das Perdas em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica”. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, UNICAMP/1999.
- [4] Civanlar, S.; J.J. Grainger; H. Yin and S.S.H. Lee. “Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction”. IEEE. 1988.
- [5] Merlin, A. and Back, H. “Search for a Minimal-Loss Operating Spanning Tree Configuration in an Urban Power Distribution System”. Proc. 5th Power System Computation Conference (PSCC), Cambridge (UK). 1975.
- [6] Lee, R. E. and Brooks, C. L. “A Method and Its Application to Evaluate Automated Distribution Control”. IEEE 1988.
- [7] Lyra Filho, C.; Pissarra, C. and Cavellucci, C. “Redução de Perdas na Distribuição de Energia Elétrica”. Anais do XIII Congresso Brasileiro de Automática – CBA. 2000.
- [8] Shirmohammadi, D. and Hong, H. “Reconfiguration of Electric Distribution Networks for Resistive Line Losses Reduction”. IEEE. 1989.
- [9] Vargas, P. A.; Lyra Filho, C. and Von Zuben, F. J. “Learning Classifiers on Guard Against Losses in Distribution Networks”. IEEE/PES T&D 2002 Latin America. 2002.
- [10] Zhou, Q.; Shirmohammadi, D. and Liu, W. H. E. “Distribution Feeder Reconfiguration for Operation Cost Reduction”. IEEE. 1997.