



## Identificação de Estratégias de Exploração de Redes de Distribuição de Energia Eléctrica Utilizando Simulated Annealing

Jorge Pereira - FEP & INESC - jpereira@inescn.pt  
J. Tomé Saraiva - FEUP/DEEC & INESC - jsaraiva@inescn.pt  
Maria Teresa Ponce de Leão - FEUP/DEEC & INESC - mleao@inescn.pt

FEP - Faculdade de Economia da Universidade do Porto  
FEUP/DEEC - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto  
INESC - Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores  
Largo Mompilher, 22, 4050 - 392 Porto, PORTUGAL, Fax: +351.2.2084172

**Resumo:** Neste artigo é apresentado um modelo para identificação de estratégias óptimas de exploração de redes de distribuição de energia eléctrica considerando-se que se pretende minimizar a potência activa de perdas. Este objectivo pode ser atingido por modificação das tomadas de transformadores ou por alteração dos escalões de baterias de condensadores em serviço. Por outro lado, e pretendendo-se tornar mais realista o modelo utilizado, admite-se a especificação de gamas de tensão admissíveis para cada barramento e de limites para a intensidade de corrente nos ramos. A natureza discreta deste problema associada à elevada dimensão que assume em situações reais insere-o na classe dos problemas combinatórios. Estes problemas, NP completos, são de difícil resolução na prática pelo que a sua resolução exacta, para redes de dimensão real, está associada a tempos de cálculo incomportáveis. Essa natureza combinatória introduz elevadas dificuldades na aplicação directa de modelos de programação matemática, verificando-se que a aplicabilidade destes modelos fica restringida a problemas de dimensões reduzidas. Neste âmbito, as meta-heurísticas têm demonstrado constituir formas eficientes para tratar problemas possuindo estas características.

Neste artigo descreve-se a utilização de uma meta-heurística - *Simulated Annealing* - com o intuito de ultrapassar as dificuldades descritas. A aplicação deste método à resolução do problema, permite identificar em tempo útil soluções baseadas em modelos exactos. A aplicação desenvolvida será ilustrada com resultados obtidos com uma rede teste do IEEE e com uma rede baseada numa rede de distribuição real possuindo 645 barramentos.

### 1. Posicionamento do Problema

A exploração das redes de distribuição de energia eléctrica tem vindo a assumir nos anos mais recentes uma importância crescente dado que é a este nível que se verifica a ocorrência de situações mais problemáticas em relação à qualidade de serviço e a aspectos relacionados com a sua operação em boas condições do ponto de vista económico. Deste ponto de vista, a identificação de estratégias óptimas de exploração tendo em conta a minimização da potência activa de perdas assume uma relevância crescente. A exploração destas redes é fortemente determinada pela topologia em exploração, pela posição de tomadas de transformadores e pelos escalões de baterias de condensadores colocados em serviço. Estes aspectos reflectem-se sob diversas formas nas condições de exploração das redes e na qualidade de serviço oferecida aos consumidores:



- por um lado, a produção localizada de potência reactiva é um importante recurso que permite diminuir os trânsitos de potência reactiva nos ramos das redes. Os condutores instalados poderão assim ser utilizadas de forma mais completa para transmissão de potência activa evitando ou adiando novos investimentos;
- a identificação das tomadas de transformadores e dos escalões de baterias de condensadores pode ser realizada especificando um conjunto mais ou menos alargado de restrições que deverão ser verificadas. Entre elas poderão ser consideradas restrições associadas aos limites de intensidade de corrente em ramos ou restrições impondo gamas admissíveis para o módulo da tensão nos nós. A imposição destas restrições para o módulo das tensões pode ser interpretada permitindo especificar variações máximas admissíveis para a tensão incluindo, portanto, a especificação de quedas de tensão máximas admissíveis. Desta forma contribui-se para garantir uma qualidade de serviço acrescida;

A literatura da especialidade inclui diversos modelos destinados a otimizar as condições de exploração de redes de distribuição de energia eléctrica. Assim e a título de exemplo, nas publicações [1] a [5] descrevem-se modelos e algoritmos tendo em vista identificar as estratégias óptimas de reconfiguração - *switching* em literatura de língua inglesa - de redes de distribuição. Neste sentido, a capacidade de reconfiguração é entendida como um recurso importante que as empresas distribuidoras poderão e deverão utilizar para minimizar os custos de exploração. Por outro lado, nas publicações [6] a [9] são descritos algoritmos destinados a seleccionar os pontos de funcionamento de baterias de condensadores e de tomadas de transformadores de modo a minimizar a potência de perdas, considerando agora que a topologia em exploração é fixa.

A um outro nível, os investimentos crescentes realizados na área da distribuição permitem que um número cada vez mais elevado de equipamentos seja telecomandado e que se disponha nos Centros de Condução, em tempo real, de medidas de um número de grandezas cada vez maior. Estas novas capacidades e a possibilidade de tratar problemas de dimensão cada vez mais elevada, como os associados às redes de distribuição, tem feito com que se passe de forma cada vez mais frequente de sistemas SCADA instalados nos referidos Centros de Condução para verdadeiros sistemas de apoio à exploração em tempo real das redes de distribuição. A instalação destes sistemas nas redes de distribuição significa, de algum modo, que diversos conceitos e aplicações, devidamente adaptadas, têm vindo a migrar dos EMS existentes nas redes de transmissão para as redes de distribuição dando origem a DMS - *Distribution Management Systems*. A investigação relatada nesta publicação integra-se nesta linha de preocupações: desenvolver novas aplicações, nalguns casos, e adaptar aplicações existentes, noutros, por forma a responder a problemas concretos de exploração de redes de distribuição de energia eléctrica.

Na secção 4 esta comunicação inclui resultados de utilização da aplicação desenvolvida considerando:

- uma rede teste do IEEE - 24 nós/36 ramos. Esta rede foi convenientemente adaptada sendo considerados cinco transformadores possuindo cada um deles 11 tomadas. A solução óptima em termos de minimização de perdas - obtida por enumeração e análise de todas as configurações possíveis - foi também identificada por forma a comparar os resultados com os obtidos utilizando o *Simulated Annealing*;
- uma rede realista possuindo 645 nós incluindo quatro transformadores possuindo 21 tomadas cada, um transformador com 19 tomadas, e quatro baterias de condensadores possuindo cada uma dois escalões possíveis de produção de reactiva.



## 2. Simulated Annealing - Descrição Geral

### 2.1. Aspectos gerais

A dificuldade de resolução de problemas reais possuindo carácter combinatório conduz a que, na prática, se recorra frequentemente a meta-heurísticas, implementações suficientemente flexíveis em termos da sua capacidade de modelizar restrições particulares muitas vezes bastante complexas.

O *Simulated Annealing* [10-12] foi a meta-heurística escolhida para a resolução do problema em análise. A escolha foi orientada na tentativa de conciliar a obtenção de resultados credíveis e simultaneamente garantir uma flexibilidade de adaptação do algoritmo a novas solicitações. Em linhas gerais, este método baseia-se na pesquisa aleatória tendendo para o óptimo de forma assintótica.

Esta meta-heurística foi pela primeira vez apresentada por Kirkpatrick [10] com base no algoritmo de Metropolis desenvolvido em 1953. Este autor apresentou uma simulação eficiente do comportamento de um conjunto de átomos em equilíbrio a uma temperatura fixa e construiu uma teoria consistente considerando as leis da física do estado sólido e a forte analogia entre os processos termodinâmicos e respectivas leis físicas, em sistemas constituídos por muitas partículas. Kirkpatrick generalizou a abordagem e aplicou-a a problemas possuindo carácter combinatório.

O processo de Metropolis é constituído basicamente por duas etapas. Na primeira procede-se à elevação inicial da temperatura a um estado de energia máxima e, na segunda, verifica-se o seu abaixamento sucessivo e suficientemente lento para que as partículas do sistema se combinem por forma a atingirem o estado de energia mínima, isto é, de tal forma que seja atingido o equilíbrio térmico.

A simulação da evolução das soluções é baseada em técnicas de Monte Carlo e na geração de estados sucessivos. Supõe-se como ponto de partida um estado possuindo energia  $E_i$  a partir do qual, recorrendo a um mecanismo apropriado, é gerado um outro estado com energia  $E_j$ . Se a diferença de energias  $E_j - E_i$  for inferior ou igual a zero o novo estado é aceite como estado actual. Se a condição anterior não se verificar o novo estado poderá ser ainda aceite com uma probabilidade função da diferença de energias entre estados sucessivos e da temperatura do banho. A expressão (1) apresenta o processo de cálculo dessa probabilidade.

$$p = e^{\left(\frac{E_i - E_j}{K_B T}\right)} \quad (1)$$

T                      Temperatura

$K_B$                       Constante de Boltzman

O processo de arrefecimento simulado tem a particularidade de permitir o relaxamento transitório da optimalidade durante o processo de pesquisa. Este relaxamento é admitido na tentativa de evitar a convergência para óptimos locais.

### 2.2. Analogia entre os processos combinatório e termodinâmico

Esta analogia pode ser realizada da seguinte forma:

- as **soluções** ou **alternativas** do problema combinatório têm equivalência nos diferentes **estados** do sistema.
- o **custo** ou **avaliação** de cada solução têm equivalência na **energia** associada aos estados.
- o **parâmetro de controlo** de aceitação de soluções tem equivalência no **parâmetro temperatura**.

A implementação prática do método consiste em partir de uma solução inicial gerada por um



método auxiliar. A partir da solução base é gerado um conjunto de vizinhanças a partir do qual será escolhida a nova solução. O processo repete-se sucessivamente até que se atinja o critério de paragem. A escolha das soluções é determinada por sorteio no conjunto dos vizinhos associado a um critério de selecção. A selecção entre duas soluções,  $i$  e  $j$ , baseia-se no cálculo da probabilidade de aceitação dada pela equação (2).

$$P_{(\text{aceitação})} = \begin{cases} 1 & \text{se } f(i) \leq f(j) \\ e^{-\frac{f(i)-f(j)}{c}} & \text{se } f(i) > f(j) \end{cases} \quad (2)$$

Para a aplicação do método de Kirkpatrick têm que ser tomadas algumas decisões de índole genérica e específicas do problema. As decisões e o desenvolvimento da aplicação do método serão detalhadas na secção seguinte.

### 2.3. *Simulated Annealing* e identificação de estratégias óptimas de exploração

Utiliza-se aqui a analogia formal entre o processo apresentado por Metropolis e o problema combinatório de exploração de redes de distribuição de energia eléctrica que se pretende resolver. Assim:

- as **combinações possíveis de tomadas de transformadores e baterias de condensadores** do problema combinatório são equivalentes aos diferentes **estados** dos sistemas de muitas partículas e constituem o espaço das soluções.
- o **atributo da função aceitação** é equivalente à **energia** dos diferentes estados. Neste problema a função aceitação corresponde à soma pesada das perdas activas, e de funções de penalidade. Estas, por seu lado, dependem da violação de limites térmicos das intensidades de corrente em ramos da rede e de violações das gamas de variação admitidas para a tensão nos barramentos.
- o **parâmetro de controlo**, que regula a quantidade de soluções aceites actuando sobre a probabilidade de aceitação, é equivalente à **temperatura**.

A solução inicial corresponde, por defeito, a um nivelamento idêntico das tomadas dos transformadores e à colocação fora de serviço das secções de baterias de condensadores. A partir desta solução base é gerada uma vizinhança que inclui todas as combinações possíveis resultantes da modificação, para cima ou para baixo, de um degrau das tomadas dos equipamentos ou da secção de baterias de condensadores.

A escolha das soluções é resultante de um sorteio no conjunto dos vizinhos, associado a um critério de selecção sendo a aceitação determinada por uma probabilidade de aceitação,  $P(\text{aceitação})$ . A nova solução é aceite se for melhor que a anterior e, sendo pior, mediante uma determinada probabilidade tal como se apresenta na equação (2). O processo repete-se sucessivamente até que se atinja o critério de paragem.

De notar que, atendendo à forma como é conduzido o método de pesquisa em que a  $P(\text{aceitação})$  depende da função de avaliação, não existe qualquer dificuldade em considerar funções não lineares. A necessidade de linearização das funções objectivo para facilitar a resolução deste tipo de problemas deixa de fazer sentido.

### 2.4. Decisões Gerais

Procedimentos gerais são aqueles que têm a ver com o escalonamento do abaixamento sucessivo da temperatura. O processo de arrefecimento do *Simulated Annealing* consiste em: (1) definir o valor inicial de temperatura, (2) definir a função de decremento, (3) determinar o número de iterações a realizar para cada nível de temperatura e por fim (4) definir a temperatura mínima.

- (1) A temperatura inicial ou parâmetro de controlo ( $T_0$ ) não deve ser demasiado baixa para evitar a convergência para óptimos locais, nem demasiado elevada por forma a evitar tempo de cálculo excessivo. O equilíbrio entre estes dois aspectos revela-se importante



dado que os estudos de optimização da exploração de redes de distribuição de energia eléctrica deverão permitir obter respostas de forma rápida.

- (2) O número de iterações (que equivale ao tempo durante o qual a temperatura é mantida constante) é especificado tendo como base experiências relatadas na literatura ou de problemas cujo controlo dos resultados seja um facto. O número de possíveis vizinhos é calculado à partida simultaneamente com o cálculo da temperatura inicial. Mais uma vez este valor depende da dimensão do problema e da precisão com que se pretende obter a solução final.
- (3) A função abaixamento da temperatura deve ser escolhida de forma a conduzir a menores tempos de cálculo para idêntica qualidade nos resultados. O parâmetro  $\beta$  da expressão (3) define a função decréscimo da temperatura.

$$T_i = \beta^i \times T_0 \quad (3)$$

- (4) O ponto de energia mínima ou de paragem do processo deve ser determinado de forma que para, um determinado nível de temperatura, o número de vezes em que foram aceites novas soluções seja inferior a um valor pré-especificado. O limite consiste em pelo menos uma solução ser aceite numa sequência de iterações ou então a temperatura atingir um valor mínimo do calor inicial.

### 2.5. Decisões Específicas do Problema

**Estrutura da vizinhança** - esta estrutura é gerada por um mecanismo de pesquisa que elimina as soluções não admissíveis do espaço de soluções. Este procedimento consiste na construção do conjunto de todas as combinações possíveis de posições das tomadas de transformadores e de secções de baterias de condensadores em exploração.

A **avaliação das alternativas** que são encontradas ao longo do processo de pesquisa é realizada através da função de avaliação. Na aplicação em análise este é um processo simples que se realiza com recurso a um módulo auxiliar para cálculo eléctrico (Trânsito de Potências) que permite avaliar valor das perdas por efeito de Joule, o valor das tensões e as intensidades de corrente nos ramos para a solução em questão.

### 3. Formulação Matemática do Problema

O problema de minimização da potência activa de perdas pode ser formulado por (4) a (9):

$$\min z = \sum_{nr} g_{ij} \cdot (V_i^2 + V_j^2 - 2 \cdot V_i \cdot V_j \cdot \cos \theta_{ij}) \quad (4)$$

$$\text{suj. } h(V, \theta, t_f, e_c) = 0 \quad (5)$$

$$V^{\min} \leq V \leq V^{\max} \quad \text{para cada nó} \quad (6)$$

$$|I_{ij}| \leq |I_{ij}|^{\max} \quad \text{para cada ramo} \quad (7)$$

$$t_f \in \{t_{f1}, t_{f2}, t_{f3}, \dots\} \quad \text{para cada transformador com tomadas} \quad (8)$$

$$e_c \in \{e_{c1}, e_{c2}, e_{c3}, \dots\} \quad \text{para cada bateria de condensadores} \quad (9)$$

Nesta formulação:

- $h$  representa as equações do problema de trânsito de potências;
- $t_f$  representa um dos valores disponíveis de tomadas de transformadores;
- $e_c$  representa um dos valores disponíveis de secções de baterias de condensadores;
- $V$  e  $\theta$  representam o módulo e a fase da tensão em cada barramento da rede;



- $g_{ij}$  corresponde à condutância do ramo  $ij$ ;
- $|I_{ij}|$  representa o módulo da intensidade de corrente no ramo  $ij$ .

Este problema tem sido resolvido considerando, numa primeira aproximação, que as tomadas dos transformadores e as secções em serviço das baterias de condensadores são representadas por variáveis contínuas. O problema assim modificado corresponde a um problema de optimização não linear que pode ser resolvido, por exemplo, pelo método do gradiente. A solução obtida desta forma é, finalmente, aproximada para a solução discreta mais próxima. Esta estratégia de solução apresenta diversos inconvenientes. Por um lado, o método do gradiente poderá convergir para óptimos locais além de poder necessitar de um número elevado de iterações. Por outro lado, o problema original é inteiro pelo que a solução final encontrada não corresponderá, em geral, ao óptimo.

A aplicação desenvolvida utiliza o *Simulated Annealing* para identificar uma estratégia que permita minimizar a potência activa de perdas. De acordo com a descrição realizada no ponto 2, apresenta-se em seguida o algoritmo adoptado:

- executar um estudo inicial de trânsito de potências assumindo uma posição inicial para as tomadas dos transformadores e para as secções de baterias de condensadores em exploração;
- considerar a solução inicial identificada no estudo anterior como solução corrente ( $x^{\text{corrente}}$ ) e como solução óptima corrente ( $x^*$ ). Cada solução é caracterizada pelo valor global da potência de perdas por efeito de Joule, tensões em módulo e fase nos barramentos, tomadas de transformadores e secções de baterias de condensadores em exploração;
- caracterizar a qualidade da solução corrente calculando o valor da função de avaliação ( $F(x^{\text{corrente}})$ );

atribuir o valor  $F(x^{\text{corrente}})$  a  $F(x^*)$

inicializar o contador de iterações  $n$  em 1;

inicializar o contador de soluções de pior qualidade que a corrente, ContaPior, em 0;

inicializar o parâmetro Temperatura na temperatura inicial igual a 1.0;

O valor da função de avaliação para uma solução genérica  $x$  caracterizada pelo valor das grandezas referidas em cima é dado por:

$$\begin{aligned}
 F(x) = \text{PerdasActivas} + & \sum_{\text{todos os nós}} (V_{\text{mag}_i} - V_i^{\text{max}}) \cdot f_1(V_{\text{mag}_i}) + \\
 & + \sum_{\text{todos os nós}} (V_i^{\text{min}} - V_{\text{mag}_i}) \cdot f_2(V_{\text{mag}_i}) + \\
 & + \sum_{\text{todos os ramos}} \left( \frac{I_i - I_i^{\text{max}}}{I_i^{\text{max}}} \right) f_3(I_i)
 \end{aligned} \quad (10)$$

$$f_1(V_{\text{mag}_i}) = \begin{cases} 0 & , \text{ se } V_{\text{mag}_i} \leq V_i^{\text{max}} \\ \text{PerdasActivas} & , \text{ se } V_{\text{mag}_i} > V_i^{\text{max}} \end{cases} \quad (11)$$

$$f_2(V_{\text{mag}_i}) = \begin{cases} 0 & , \text{ se } V_{\text{mag}_i} \geq V_i^{\text{min}} \\ \text{PerdasActivas} & , \text{ se } V_{\text{mag}_i} < V_i^{\text{min}} \end{cases} \quad (12)$$



$$f_3(I_i) = \begin{cases} 0 & , \text{ se } I_i \leq I_i^{\max} \\ \text{PerdasActivas} & , \text{ se } I_i > I_i^{\max} \end{cases} \quad (13)$$

- iv) identificar uma solução na vizinhança da solução corrente ( $x_n$ ). Esta identificação é realizada seleccionando de forma aleatória um transformador ou banco de capacidades no qual a tomada respectiva ou secções em exploração são modificadas de uma unidade;
- v) executar um estudo de Trânsito de Potências para esta nova solução  $x_n$  e calcular o valor da função de avaliação  $F(x_n)$  utilizando a expressão (10);
- vi) actualizar os valores da solução óptima corrente e da solução corrente considerando:
  - se  $F(x_n) \leq F(x^*)$  então
    - atribuir  $x_n$  a  $x^*$  e a  $x^{\text{corrente}}$
    - colocar ContaPior em 0
  - senão
    - obter um número aleatório  $p$
$$p(\text{patamar } s) = \exp\left(\frac{F(x^{\text{corrente}}) - F(x_n)}{0.00025 \times \text{temperatura}}\right)$$
  - se  $p \leq p(\text{patamar } s)$  então atribuir  $x_n$  a  $x^{\text{corrente}}$
  - incrementar o valor de ContaPior;
- vii) se ContaPior > número máximo de iterações sem melhoria então ir para ix)
- viii) se  $n >$  número máximo de iterações por nível de temperatura então
  - colocar temperatura = ritmo de arrefecimento \* temperatura
  - se temperatura < temperatura final então ir para ix)
  - colocar  $n$  em 1;
  - senão incrementar  $n$  para  $n+1$ ;
  - ir para iv)
- ix) fim

De acordo com este algoritmo, a avaliação da qualidade de uma solução é realizada calculando o valor global da potência activa de perdas na rede e integrando parcelas representando penalidades associadas a violações da gama de valores admitidos para o módulo das tensões e a violações de limites de intensidades de corrente em ramos da rede. Em qualquer destas duas situações, assume-se que os valores do módulo das tensões e da intensidade de corrente se encontram em pu correspondendo a penalidade atribuída ao valor corrente da potência de activa de perdas.

#### 4. Exemplos de Aplicação

##### 4.1. Rede teste de 24 barramentos/36 ramos do IEEE

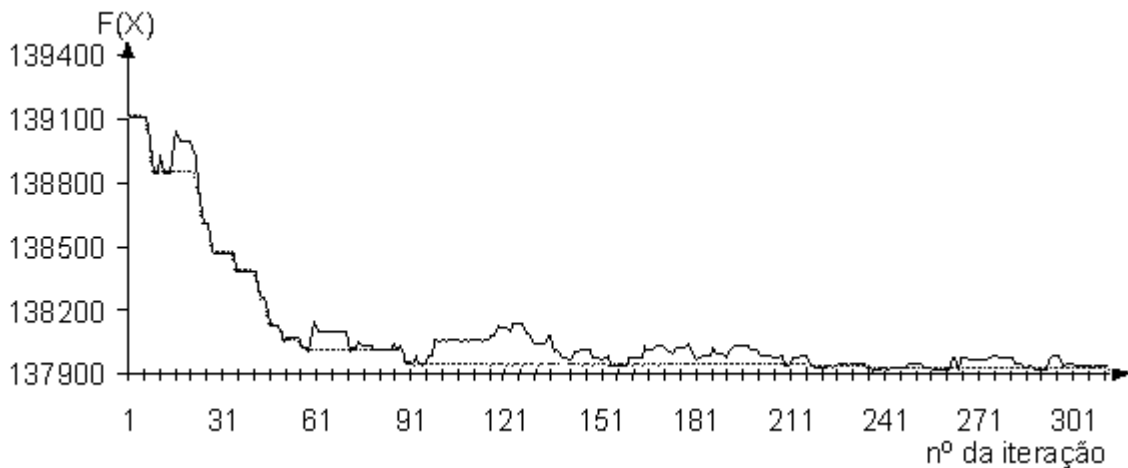
Neste ponto apresentam-se os resultados obtidos para a rede teste do IEEE com 24 barramentos e 36 ramos descrita em [13]. Dos 36 ramos, 31 correspondem a linhas e 5 a transformadores. No teste realizado considerou-se que cada transformador possuía 11 tomadas, podendo o valor da tomada variar entre 0.95 e 1.05 com um incremento de 0.01. As tomadas dos transformadores encontravam-se inicialmente na posição nominal (posição 6 a que corresponde o valor de 1.0). Com estas tomadas e considerando como valores das cargas os especificados em [13] multiplicados por 1.8, obteve-se o valor inicial da função de aceitação de 139112.49.

Os parâmetros do *Simulated Annealing* para este exemplo relacionados com a temperatura são:

- o número de iterações a realizar para a mesma temperatura é de 25;
- a temperatura inicial é de 1.0, diminuindo de 95% de cada vez;
- o número de iterações que é possível realizar sem haver melhoria da função de aceitação é de 75;

Com estes parâmetros o algoritmo realizou 312 iterações, tendo a temperatura diminuído até ao valor de 0.54, conseguindo-se um valor para a função objectivo de 137916.45. Em relação ao valor da função de aceitação para a solução inicial obteve-se uma melhoria de 1196.04.

Na Figura 1 apresenta-se a evolução da função do valor da função de aceitação para a solução actual identificada ao longo do processo de pesquisa (representada através de linha contínua no gráfico) e para a melhor solução encontrada até essa iteração (representada através de uma linha a tracejado no gráfico).



**Figura 1 – Evolução da função de aceitação para a solução actual de pesquisa (traço contínuo) e para o melhor valor encontrado (a tracejado) na rede com 24 barramentos.**

#### 4.2. Rede baseada numa rede de distribuição portuguesa

Neste ponto apresentam-se os resultados obtidos para uma rede baseada numa rede de distribuição portuguesa possuindo 645 barramentos. Nesta rede consideraram-se 4 transformadores com 21 tomadas no primário, podendo o valor da tomada variar entre 0.85 e 1.15 com um incremento de 0.015, um transformador com 19 tomadas no secundário, podendo o valor da tomada variar entre 0.85 e 1.15 com um incremento de 0.0167. As tomadas dos transformadores estavam inicialmente na posição nominal (posição 11 e 10, respectivamente, a que corresponde o valor de 1.0). Consideraram-se ainda 4 baterias de condensadores possuindo cada uma dois valores possíveis de injeção de potência reactiva correspondentes às posições de ligada e desligada. Inicialmente estas 4 baterias encontravam-se ligadas. Com estas tomadas e as baterias neste estado, obteve-se o valor inicial da função de aceitação de 825.83.

Os parâmetros do *Simulated Annealing* para este exemplo relacionados com a temperatura são:

- o número de iterações que é possível realizar para a mesma temperatura é de 45;
- a temperatura inicial é de 1.0, diminuindo de 95% de cada vez;
- o número de iterações que é possível realizar sem haver melhoria da função de aceitação é de 135.



Com estes parâmetros o algoritmo realizou 256 iterações, tendo a temperatura diminuído até ao valor de 0.77. A função de aceitação assume então o valor de 741.19, o que corresponde a uma melhoria de 84.64 em relação à solução inicial.

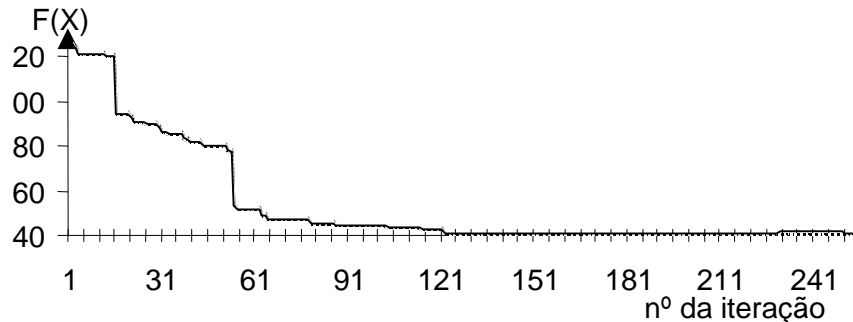


Figura 2 – Evolução da função objectivo para a solução actual de procura (a traço contínuo) e para o melhor valor encontrado (a tracejado) na rede com 645 barramentos.

Na Figura 2 apresenta-se a evolução da função de aceitação para a solução actual de procura (linha contínua no gráfico) e para a melhor solução encontrada até essa iteração (linha tracejada no gráfico). Nesta representação gráfica as duas linhas quase coincidem. Esta situação é explicada atendendo à dimensão do gráfico dado que a solução actual alterou-se durante todo o processo 143 vezes contra as 38 melhorias registadas na melhor solução identificada.

#### 4.3. Comentários

Tendo em vista avaliar a performance do algoritmo em termos da sua capacidade para identificar o óptimo global foram testadas todas as combinações possíveis associadas às posições das tomadas dos transformadores existentes na rede teste de 24 barramentos/36 ramos. Recorde-se que nesta rede existiam 5 transformadores possuindo cada um deles 11 tomadas. Isto significa que este processo de enumeração exigiu a resolução de 161051 estudos de Trânsito de Potências. Como conclusão, assinala-se que a solução identificada pelo algoritmo baseado no *Simulated Annealing* coincide com a solução identificada pelo processo de enumeração. Este aspecto é tanto mais relevante se se considerar que o processo de enumeração exige a resolução de 161051 estudos de Trânsito de Potências e o algoritmo baseado no *Simulated Annealing* realizou apenas 312 estudos deste tipo. Assim, se o tempo de resolução de um estudo de Trânsito de Potências for considerado a unidade de tempo, pode verificar-se que o tempo de cálculo diminui para 0.19%.

No caso da rede possuindo 645 barramentos revela-se impraticável realizar o mesmo tipo de análise por enumeração. Com efeito, essa possui 4 transformadores com 21 tomadas e 1 com 19 tomadas, bem como 4 baterias de condensadores, cada uma delas com duas posições possíveis. Esta situação conduz a 59 122 224 combinações possíveis, isto é, à necessidade de realizar 59 122 224 estudos de trânsitos de potência. Se o tempo de cálculo de cada estudo deste tipo fosse de 0.1 segundos, esta análise por enumeração demoraria cerca de dois meses a ser completada.

#### 5. Conclusões

Nesta comunicação apresentou-se uma metodologia baseada em *Simulated Annealing* para identificação de estratégias óptimas de exploração da redes de distribuição. A metodologia é simples e eficiente permitindo resolver o problema de carácter combinatório num intervalo de tempo muito curto quando comparado com estratégias baseadas na enumeração de todas as



combinações possíveis. Por outro lado, este método afigura-se adequado ao tratamento das funções de avaliação das soluções do problema não-lineares sem aumento considerável do esforço computacional.

Tendo em vista avaliar o desempenho da aplicação desenvolvida foram realizados testes considerando duas redes, correspondendo uma delas a uma situação realista. Em qualquer dos casos foi possível verificar o bom desempenho da metodologia descrita.

Como desenvolvimento do trabalho apresentado os autores estão a trabalhar na aplicação da metodologia formulando o problema como multi-objectivo explícito em contraposição à utilização da função utilidade aqui adoptada. Os resultados desta nova abordagem serão objecto de futuras comunicações.

#### Bibliografia

- [1] I. Roytelman, V. Melnik, S. S. Lee, R. L. Lugtu, "Multi-Objective Feeder Reconfiguration by Distribution Management System", in Proceedings of Power Industry Computer Application Conference, PICA' 95, Maio 1995;
- [2] R. J. Sarfi, M. M. Salama, A. Y. Chikhani, "Distribution System Reconfiguration for Loss Reduction: An Algorithm Based on Network Partitioning Theory", in Proceedings of Power Industry Computer Application Conference, PICA' 95, Maio 1995;
- [3] J. N. Wrubel, P. S. Rapcienski, K. L. Lee, B. S. Gisin, G. W. Woodzell, "Practical Experience with Corrective Switching Algorithm for On-Line Applications", in Proceedings of Power Industry Computer Application Conference, PICA' 95, Maio 1995;
- [4] P. Verho, P. Jarventausta, M. Karenlampi, J. Partanen, "Reducing the Operation Cost of a Distribution Network via Reconfiguration", in Proceedings of Stockholm Power Tech, SPT'95, Junho 1995;
- [5] G. J. Peponis, M. P. Papadopoulos, N. D. Hatzargyriou, "Optimal Operation of Distribution Networks", IEEE PES 1995 Winter Meeting, Nova Iorque, 1995;
- [6] M. Larsson, D. Karlsson, "Coordinated Control of Cascaded Tap Changers in a Radial Distribution Network", in Proceedings of Stockholm Power Tech, SPT'95, Junho 1995;
- [7] M. Y. Cho, C. S. Chen, "Distribution Feeder Reactive Power Compensation by Shunt Capacitor", in Proceedings of Stockholm Power Tech, SPT'95, Junho 1995;
- [8] J. R. Laframboise, G. Ferland, A. Y. Chikhani, M. M. Salama, "An Expert System For Reactive Power Control of a Distributed System Part 2: System Implementation", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, no. 3, Agosto 1995;
- [9] Tan, Loc Le, Michael N., (1997), Expert System for Voltage and VAR Control in Power Transmission and Distribution Systems, IEEE Trans. PWRD, Vol. 12, No. 3, Agosto 1997.
- [10] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, M. P. Vecchi, "Optimization by Simulated Annealing", Science, Vol. 220, No. 4598, pp. 671-680, 1983.
- [11] E. Aarts, J. Korst, Simulated Annealing and Boltzman Machines, John Wiley & Sons, New York, 1990.
- [12] M. T. Ponce de Leão, M. A. Matos, "Multicriteria Distribution Network Planning Using Simulated Annealing", EURO XIV - 20<sup>th</sup> European Conference on Operational Research, Jerusalém, Julho 1995; Aceite para publicação em *International Transactions in Operational Research*, Elsevier Science.
- [13] Reliability Test System Task Force of the Application of Probability Methods Subcommittee, "IEEE Reliability Test System", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-98, No. 6, Nov./Dec. 1979.

#### Agradecimento

O trabalho descrito nesta publicação foi parcialmente financiado pelo contrato PRAXIS 2/2.1/TIT/1634/95.