

Aquifer development optimization: the case of the Palmela aquifer

*Teresa Melo Fragoso
ISEC- IPC*

*Maria da Conceição Cunha
DEC- FCTUC*

*João Paulo Lobo-Ferreira
LNEC*

Slide 1

LF8

Luís Filipe 18-02-2003

Os sistemas aquíferos representam importantes reservatórios hídricos e desempenham um papel importante na satisfação dos consumos de água, principalmente quando problemas relacionados com a qualidade e a quantidade afectam, cada vez mais, os recursos hídricos em geral e as águas superficiais em particular. O presente artigo apresenta a resolução de um problema de planeamento e gestão relativo ao sistema aquífero de Palmela. O problema é resolvido utilizando uma das mais recentes técnicas de optimização, o Recozimento Simulado. Este método insere-se no grupo das heurísticas modernas, contempla uma componente probabilística e adopta uma estratégia, na busca da solução óptima, não estritamente descendente, permitindo movimentos ascendentes, evitando cair em óptimos locais.

Luís Filipe, 18/02/2003

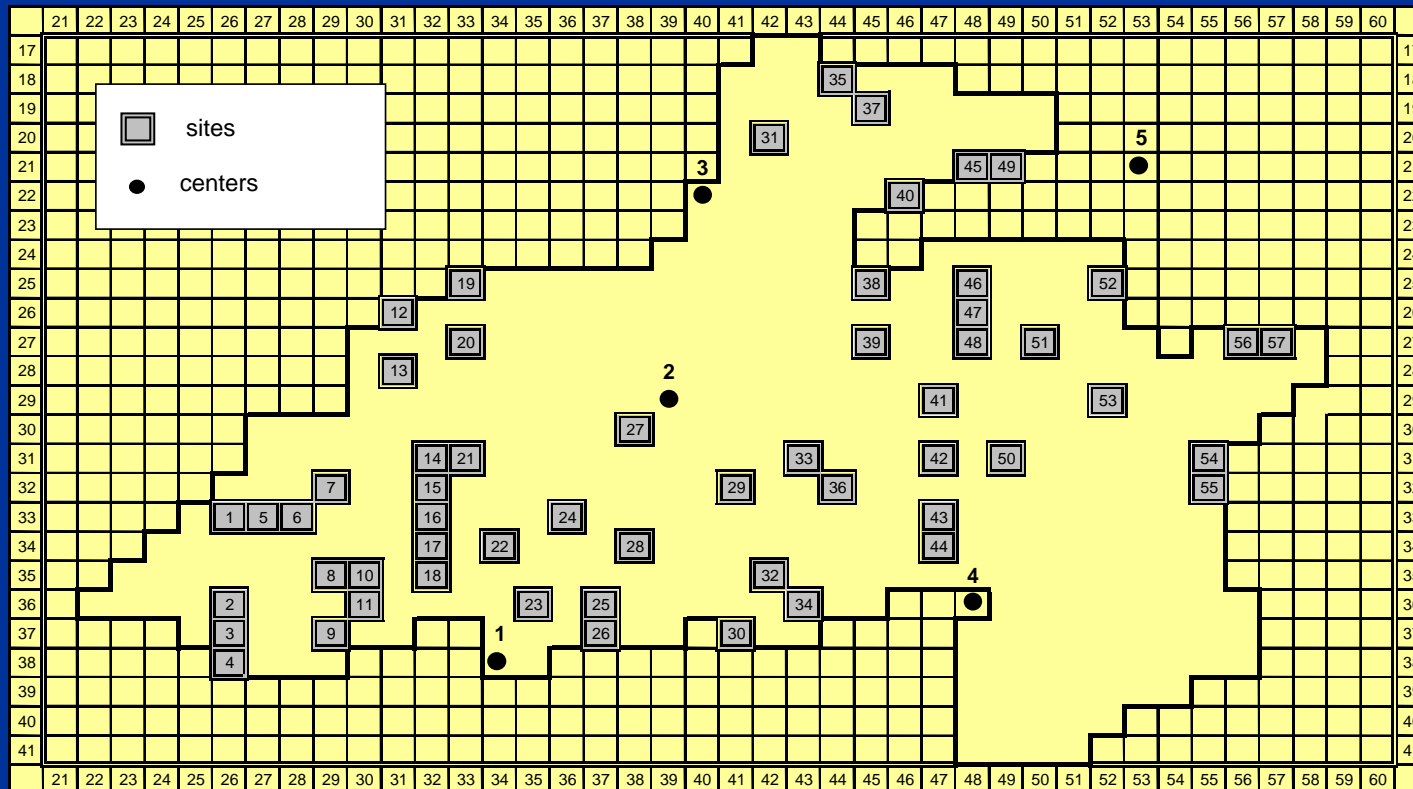
Aquifers development

- Aquifer systems can play an important role in meeting ever-increasing water demands.
- The costs of installing all the equipment for, and then running, a water supply system are of critical importance.
- It is important to use the adequate methods to find the best solutions – optimization methods

Problem Statement

To design a supply-structure system to satisfy the demands of given centers. The number of possible sites for pumping stations and the number of centers to which water has to be supplied are known, but the sizes of the pipes and pumps to be used have to be determined in such a way that demand will be fully met at the lowest possible cost, while meeting a set of constraints.

LF11



Slide 3

LF11

Como se referiu anteriormente, neste trabalho apresenta-se a resolução de um problema de planeamento e gestão relativo ao sistema aquífero de Palmela. Pretendem-se ver satisfeitas as necessidades de água de cinco aglomerados populacionais localizados sobre aquele aquífero (figura 1), com custo mínimo e respeitando restrições de ordem física, regulamentar, etc. Ter-se-á de decidir quanto ao número e localização das captações que vão abastecer cada um dos aglomerados, estes de localização e consumo fixos.

Luis Filipe, 19/02/2003

Optimization model

LF34

Objective function **LF31**

$$\text{Min} \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \alpha Q_{jk}^{\beta} H_{jk}^{\gamma} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K c_i L_{jk} x_{ijk} + PV \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K m_i L_{jk} x_{ijk} +$$

$$PV \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K c_{em} Q_{jk} H_{jk}$$

LF37

- 1 Pump capital cost
- 2 Pipe capital cost
- 3 Pipe maintenance cost
- 4 Energy and pump maintenance cost

J – Demand centers;

K – Possible well location (sites)

I – Diameters

Slide 4

LF31 Luís Filipe 18-02-2003

a função objectivo do problema pode ser traduzida pela seguinte expressão, na qual as três primeiras parcelas dizem respeito a custos de investimento e as duas últimas parcelas dizem respeito a custos de operação e manutenção:

Luís Filipe, 24/02/2003

LF34 Luís Filipe 19-02-2003

O modelo decisional que vai ser usado para resolução do problema inclui as componentes de instalação, de manutenção e de exploração. A componente de instalação vai envolver variáveis do tipo inteiro relativas a diâmetros e bombas a escolher na gama comercial disponível, bem como variáveis do tipo binário, pois engloba decisões quanto à localização das captações abastecedoras. O problema apresenta características de não linearidade, quer ao nível da função objectivo devido à variação dos custos com os caudais a bombear, quer ao nível das restrições. Trata-se, portanto, de um problema de natureza discreta e não linear.

Luís Filipe, 17/03/2003

LF37

onde:

Lck: distância entre a célula k e o centro de consumo c; cd: custo unitário de comprimento de conduta de diâmetro Dd; xdck: variável binária, é igual a 1 se existe ligação, por uma conduta de diâmetro Dd, entre c e k e é 0, caso contrário; VA: valor actual; md: custo unitário de manutenção da conduta de diâmetro Dd; profk: profundidade da captação k; p: custo de perfuração por unidade de comprimento; cr: custo de revestimento das captações por unidade de comprimento; wk: variável binária, é igual a 1 se existe captação em k e 0 caso contrário; Cbkc: custo da bomba Bb, que garante o abastecimento do aglomerado c pela célula k; Qck: caudal bombado na célula k para abastecer o aglomerado populacional c; Hck: altura de elevação da bomba para que seja possível bombear água na célula k e transportá-la até ao centro de consumo c; ce: somatório do custo unitário de manutenção da bomba e do custo da energia relativo a elevar a unidade de caudal por unidade de altura.

Luís Filipe, 25/02/2003

s. t:

LF36

$$H_{jk} = R_k + N_k + \max\left[0, Z_{jk} + \Delta H_{jk}\right], \forall j, k \quad \text{pumping head}$$

$$R_k = \sum_{k'=1}^K A_{kk'} \sum_{j=1}^J Q_{k'j}, \forall k \quad \text{LF32}$$

drawdown

$$\Delta H_{jk} = fc \frac{Q_{jk}^2}{\sum_{i=1}^I \frac{16}{D_{ijk}^3} x_{ijk}} L_{jk}, \forall j, k$$

head loss

Slide 5

LF32

Luís Filipe 19-02-2003

As equações descritivas do aquífero vão ser consideradas no modelo decisional através da utilização do método dos Coeficientes de Influência (GORELICK, 1983). Para obtenção da Matriz dos Coeficientes de Influência foi construído o modelo de simulação (MIGLIARI e LOBO-FERREIRA, 1997) que considerou sobre o aquífero a grelha de discretização apresentada na figura 1.

Figura 1 – Malha de discretização do aquífero e localização dos aglomerados populacionais.

O modelo de simulação teve em consideração as condições iniciais e de fronteira do sistema aquífero, bem como as suas características físicas, hidrogeológicas, e ainda os valores de recarga.

Luís Filipe, 24/02/2003

LF36

A primeira restrição traduz o cálculo da altura de elevação da bomba necessária para que seja possível bombear água da captação k e transportá-la até ao centro de consumo c. A restrição número dois serve para calcular o rebaixamento provocado na captação k devido a uma extracção de caudal em todo o aquífero utilizando a Matriz dos Coeficientes de Influência. A terceira restrição representa a perda de carga no transporte do caudal na conduta de diâmetro Dd que liga c a k, calculada através da fórmula de Manning-Strikler. As restrições quatro, cinco, seis e sete têm em consideração rebaixamentos máximos caudais máximos e mínimos e ainda velocidade máxima. A restrição número oito assegura que são satisfeitos os consumos de cada agregado populacional. Surge ainda um grupo de restrições com as quais se assegura que se existe solicitação de água por parte do centro c à captação k, então existe um e um só diâmetro comercial, escolhido na gama disponível, a ligar o centro c à captação k. Este grupo é constituído pelas restrições nove e dez. A restrição número onze indica as variáveis binárias.

Luís Filipe, 25/02/2003

$$R_k \leq R_{\max k}, \forall k$$

maximum drawdown

$$\sum_{j=1}^J Q_{jk} \leq Q_{\max k}, \forall k$$

maximum flow

$$Q_{jk} \leq \frac{\Pi}{4} U_{\max} \sum_{i=1}^I D_{ijk}^2 x_{ijk}, \forall j, k$$

maximum velocity

LF40

$$\sum_{k=1}^K Q_{jk} = Q_j, \forall j$$

demand satisfied

Slide 6

LF40 Vmax =1.5m/s (segundo a NP - 837)
Luís Filipe, 25/02/2003

LF41

	Centro de Consumo	Coordenadas	Necessidades hídricas
		(m3s-1)(m3dia-1)	
1	34, 38	0.01 864	
2	39, 29	0.03 2592	
3	40, 22	0.08 6912	
4	48, 36	0.08 6912	
5	53, 21	0.06 5184	

Quadro 6.1 – Coordenadas e consumos de cada um dos aglomerados populacionais considerados.
Luís Filipe, 25/02/2003

$$Q_{jk} \leq G \cdot y_{jk}, \forall j, k$$

$$\sum_{i=1}^I x_{ijk} = y_{jk}, \forall j, k.$$

$$x_{ijk}, y_{jk} \in \{0,1\} \forall j, k.$$

pipe linking center j to site k , if center j is supplied by site k , and that diameters will be chosen only if a pipe linking center j to site k exists. **LF45**

binary variables

Slide 7

LF45

as restrições 9 e 10 servem para garantir que existe uma conduta a ligar a captação k ao centro de consumo c , se existe solicitação por parte deste aquela. e que o diâmetro só é escolhido nestas condições.

Luís Filipe, 26/02/2003

LF47

Model characteristics

- The objective function and set of constraints are simultaneously:
discrete
highly non-linear.

LF48

- The model to be solved is a non-linear-mixed integer model.

LF49

LF50

LF51

6.4 IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO DO RECOZIMENTO SIMULADO

Um dos aspectos fundamentais na implementação do Recozimento Simulado é a geração de soluções candidatas do problema e com o qual o algoritmo irá trabalhar. Chamam-se soluções possíveis ou candidatas todas as soluções que satisfaçam as restrições impostas pelo problema.

No processo de geração de uma solução candidata é importante o conceito de solução vizinha. Assim, neste contexto, torna-se fundamental introduzir o conceito de vizinhança. Entenda-se por vizinhança, o conjunto de soluções que podem resultar da solução anterior, por pequenas alterações realizadas nesta. Isto é, uma solução s' diz-se fazer parte da vizinhança da solução s se e só se resultou de uma modificação nesta, de tal forma que continue a fazer parte do conjunto de soluções possíveis. O conjunto de soluções vizinhas está contido no conjunto de soluções candidatas.

A vizinhança, é assim, dependente da forma adoptada para gerar soluções candidatas. Para tal não existem regras definidas e rígidas que servem para todos os problemas. Existem, no entanto, regras provenientes da investigação e apontadas na literatura como linhas orientadoras quando se utiliza o algoritmo do Recozimento Simulado, às quais se fará referência seguidamente (REEVES,1993).

Em cada iteração (entenda-se por iteração a passagem de uma solução candidata no teste Metropolis) estão, assim, envolvidos dois processos distintos: a geração da solução candidata e o cálculo do custo que lhe está associado. Ambos os processos deverão ser rápidos e eficientes. Relativamente ao primeiro, a forma como se geram soluções candidatas deve ser tal que, toda a solução deve poder ser gerada a partir da anterior. Isto é, a partir de uma solução, qualquer outra deve ser possível.

Por outro lado, uma vizinhança proveniente de alterações pequenas e simples leva a melhores resultados que vizinhanças resultantes de grandes e complexas alterações. É importante que o algoritmo faça uma pesquisa que cubra com lentidão o domínio de soluções possíveis. No que diz respeito ao segundo, por vezes, é possível não recalculer o custo, associado à nova solução, na íntegra mas analisar e recalculer as partes relativas às quais esta solução veio introduzir alterações.

A primeira solução com a qual o algoritmo vai trabalhar designa-se por solução inicial. Assim, o algoritmo começa por ter de encontrar uma solução inicial que respeite as restrições do problema. Esta escolha da solução inicial é aleatória ainda que possa obedecer a determinadas regras. No entanto, a solução final tem de ser independente da solução inicial.

Relativamente ao processo de arrefecimento são importantes quatro aspectos. Um deles prende-se com a escolha da temperatura inicial. Relembrando a descrição do critério de Metropolis, sendo c a função de custo e S_p o conjunto de soluções possíveis ($s \in S_p$) e estando-se a tratar, por exemplo, de um problema de minimização, gerada aleatoriamente uma solução candidata, s' , de custo $c(s')$, a partir da solução s , a transição de s para s' vai ser realizada com probabilidade $p = \min\{1, \exp(-Dc/q)\}$, em que $Dc = c(s) - c(s')$, sendo q o valor do parâmetro de controlo.

Ora, como facilmente se observa pela expressão de Metropolis, pretende-se que inicialmente q seja suficientemente elevado para que mesmo soluções muito negativas sejam aceites. Isto é, o valor inicial de q deve ser escolhido de tal forma que permita que todo o espaço de soluções seja verificado.

A expressão utilizada para o cálculo da temperatura inicial, na presente dissertação, é a seguinte (CUNHA, 1999, CUNHA e SOUSA, 2001):

$$(6.1)$$

Slide 8 (Continued)

onde c_0 representa o custo da solução inicial e a é a elasticidade de aceitação que se define como sendo a probabilidade de aceitação de uma solução cujo custo é superior ao da solução inicial de uma dada percentagem. Com esta expressão o algoritmo calcula uma temperatura tal que, inicialmente, é aceite uma percentagem de soluções com probabilidade igual a a cujo custo é superior em 10 % ao da solução inicial. Relativamente ao valor de a é necessário que este seja suficientemente elevado, para permitir uma aceitação inicial de soluções que cubra todo o espaço de soluções possíveis. Analisando o critério de Metropolis verifica-se que tal só é possível com um valor de temperatura inicial elevado. Kirkpatrick sugeriu que os valores anteriores fossem definidos de forma a garantir uma taxa de aceitação inicial (número de soluções aceites no critério de Metropolis/ número de soluções candidatas) de 80 %. Nestas condições, com uma temperatura inicial elevada, a aceitação de uma nova solução é quase imediata e a solução final tornar-se-á independente da final.

Posteriormente, tem de ser definida a forma como o parâmetro q vai ser reduzido. Na presente dissertação este arrefecimento é feito gradualmente segundo a seguinte expressão (arrefecimento geométrico):

$$, \quad (6.2)$$

O parâmetro r designa-se por taxa ou coeficiente de arrefecimento e é graças a ele que se processa a diminuição do parâmetro de controlo. Se o seu valor for muito elevado significa que se arrefece muito devagar e se testam muitos patamares de temperatura o que implica um aumento no tempo de resolução. Se r tomar um valor mais baixo arrefece-se mais rápido, "esquecem-se" alguns valores de temperatura mas o tempo de resolução é menor. Na presente dissertação este parâmetro toma um valor constante, isto é ao longo do algoritmo não varia embora existam implementações do Recozimento Simulado em que este parâmetro vai variando ao longo da execução do algoritmo.

Outro parâmetro envolvido no processo de arrefecimento é o número mínimo de iterações em cada temperatura, n_1 , isto é, o número que define o tamanho da cadeia de Markov.

Como já foi descrito, para um dado valor do parâmetro de controlo, o valor de $\exp(Dc/q)$ do critério de Metropolis, é comparado com um número aleatório entre 0 e 1. Se este número é menor que a exponencial, então a nova solução é aceite, caso contrário é rejeitada. Este processo será repetido, para aquele valor do parâmetro de controlo, um determinado número de vezes, no mínimo n_1 vezes, até a solução já não conseguir ser melhorada (estado quasi-permanente atingido) após o que se procederá à diminuição da temperatura.

Neste trabalho, aquele número é definido da seguinte forma: defini-se um número mínimo de iterações (n_1) que têm de ser feitas obrigatoriamente e ao fim das quais se avalia o custo óptimo em relação ao encontrado anteriormente e o custo médio das n_1 iterações, se não houve melhoramento a temperatura diminui. Caso contrário, as iterações continuam àquela temperatura. Verifica-se, desta forma, que o algoritmo passa mais tempo em temperaturas mais baixas, quando ainda está a trabalhar com soluções longe do óptimo. Este facto contribui para que o algoritmo não caia em óptimos locais.

Relativamente ao critério de paragem deverá ser tal que permita que o algoritmo "perceba" quando é que ainda se está a melhorar a solução e por isso ainda deve continuar a resolução.

Neste sentido, o critério de paragem utilizado nesta dissertação consiste em definir um parâmetro, n_2 , que é o número de patamares de temperatura consecutivos em que não há melhoramento do custo óptimo ou do custo médio.

Em termos práticos, se o algoritmo no n_2-1 patamar de temperatura incrementar a solução então a contagem de n_2 passa a zero e o algoritmo

Slide 8 (Continued)

continua o processo.

Luís Filipe, 20/03/2003

LF48

serve para definir a temperatura inicial. O parâmetro temperatura é um parametro fundamental do algoritmo pois é ela que de certa forma o direcciona.

Luís Filipe, 24/03/2003

LF49

iteração-passagem no critério de metropolis em que se comparam custos e se aceitam com uma dada probabilidade que está relacionada com a temperatura, para temperaturas mais elevadas a aceitação de soluções más é maior, à medida que a temepratura diminui essa probabilidade diminui. De início o algoritmo tem uma visão global do espaço de soluções possíveis mas depois vai-se localizando no sentido de melhorar a solução.

Luís Filipe, 24/03/2003

LF50

A aceitação das soluções é feita segundo uma probabilidade definida pelo chamado critério de Metropolis. Este critério traduz-se em aceitar todas as soluções melhores que a solução anterior e também as que a piorem, com uma probabilidade que é tanto menor quanto maior for a diferença de custo entre a solução que está a ser avaliada e a anterior.

Luís Filipe, 20/03/2003

LF51

Calibração do algoritmo

Luís Filipe, 24/03/2003

LF47

Model solution

- This model was solved using a simulated annealing algorithm.
- This random search heuristic method enables, at least in theory and in probability, a global optimum to be found for a function, whether constrained or not.

LF48

- The advantage of these probabilistic optimization algorithms is that, while they search for optimal solutions via a descent strategy, they also avoid situations where they cannot escape local optima by allowing upward moves.

LF49

LF50

LF51

6.4 IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO DO RECOZIMENTO SIMULADO

Um dos aspectos fundamentais na implementação do Recozimento Simulado é a geração de soluções candidatas do problema e com o qual o algoritmo irá trabalhar. Chamam-se soluções possíveis ou candidatas todas as soluções que satisfaçam as restrições impostas pelo problema.

No processo de geração de uma solução candidata é importante o conceito de solução vizinha. Assim, neste contexto, torna-se fundamental introduzir o conceito de vizinhança. Entenda-se por vizinhança, o conjunto de soluções que podem resultar da solução anterior, por pequenas alterações realizadas nesta. Isto é, uma solução s' diz-se fazer parte da vizinhança da solução s se e só se resultou de uma modificação nesta, de tal forma que continue a fazer parte do conjunto de soluções possíveis. O conjunto de soluções vizinhas está contido no conjunto de soluções candidatas.

A vizinhança, é assim, dependente da forma adoptada para gerar soluções candidatas. Para tal não existem regras definidas e rígidas que servem para todos os problemas. Existem, no entanto, regras provenientes da investigação e apontadas na literatura como linhas orientadoras quando se utiliza o algoritmo do Recozimento Simulado, às quais se fará referência seguidamente (REEVES,1993).

Em cada iteração (entenda-se por iteração a passagem de uma solução candidata no teste Metropolis) estão, assim, envolvidos dois processos distintos: a geração da solução candidata e o cálculo do custo que lhe está associado. Ambos os processos deverão ser rápidos e eficientes. Relativamente ao primeiro, a forma como se geram soluções candidatas deve ser tal que, toda a solução deve poder ser gerada a partir da anterior. Isto é, a partir de uma solução, qualquer outra deve ser possível.

Por outro lado, uma vizinhança proveniente de alterações pequenas e simples leva a melhores resultados que vizinhanças resultantes de grandes e complexas alterações. É importante que o algoritmo faça uma pesquisa que cubra com lentidão o domínio de soluções possíveis. No que diz respeito ao segundo, por vezes, é possível não recalculer o custo, associado à nova solução, na íntegra mas analisar e recalculer as partes relativas às quais esta solução veio introduzir alterações.

A primeira solução com a qual o algoritmo vai trabalhar designa-se por solução inicial. Assim, o algoritmo começa por ter de encontrar uma solução inicial que respeite as restrições do problema. Esta escolha da solução inicial é aleatória ainda que possa obedecer a determinadas regras. No entanto, a solução final tem de ser independente da solução inicial.

Relativamente ao processo de arrefecimento são importantes quatro aspectos. Um deles prende-se com a escolha da temperatura inicial. Relembrando a descrição do critério de Metropolis, sendo c a função de custo e S_p o conjunto de soluções possíveis ($s \in S_p$) e estando-se a tratar, por exemplo, de um problema de minimização, gerada aleatoriamente uma solução candidata, s' , de custo $c(s')$, a partir da solução s , a transição de s para s' vai ser realizada com probabilidade $p = \min\{1, \exp(Dc/q)\}$, em que $Dc = c(s) - c(s')$, sendo q o valor do parâmetro de controlo.

Ora, como facilmente se observa pela expressão de Metropolis, pretende-se que inicialmente q seja suficientemente elevado para que mesmo soluções muito negativas sejam aceites. Isto é, o valor inicial de q deve ser escolhido de tal forma que permita que todo o espaço de soluções seja verificado.

A expressão utilizada para o cálculo da temperatura inicial, na presente dissertação, é a seguinte (CUNHA, 1999, CUNHA e SOUSA, 2001):

$$(6.1)$$

Slide 9 (Continued)

onde c_0 representa o custo da solução inicial e a é a elasticidade de aceitação que se define como sendo a probabilidade de aceitação de uma solução cujo custo é superior ao da solução inicial de uma dada percentagem. Com esta expressão o algoritmo calcula uma temperatura tal que, inicialmente, é aceite uma percentagem de soluções com probabilidade igual a a cujo custo é superior em 10 % ao da solução inicial. Relativamente ao valor de a é necessário que este seja suficientemente elevado, para permitir uma aceitação inicial de soluções que cubra todo o espaço de soluções possíveis. Analisando o critério de Metropolis verifica-se que tal só é possível com um valor de temperatura inicial elevado. Kirkpatrick sugeriu que os valores anteriores fossem definidos de forma a garantir uma taxa de aceitação inicial (número de soluções aceites no critério de Metropolis/ número de soluções candidatas) de 80 %. Nestas condições, com uma temperatura inicial elevada, a aceitação de uma nova solução é quase imediata e a solução final tornar-se-á independente da final.

Posteriormente, tem de ser definida a forma como o parâmetro q vai ser reduzido. Na presente dissertação este arrefecimento é feito gradualmente segundo a seguinte expressão (arrefecimento geométrico):

$$, \quad (6.2)$$

O parâmetro r designa-se por taxa ou coeficiente de arrefecimento e é graças a ele que se processa a diminuição do parâmetro de controlo. Se o seu valor for muito elevado significa que se arrefece muito devagar e se testam muitos patamares de temperatura o que implica um aumento no tempo de resolução. Se r tomar um valor mais baixo arrefece-se mais rápido, "esquecem-se" alguns valores de temperatura mas o tempo de resolução é menor. Na presente dissertação este parâmetro toma um valor constante, isto é ao longo do algoritmo não varia embora existam implementações do Recozimento Simulado em que este parâmetro vai variando ao longo da execução do algoritmo.

Outro parâmetro envolvido no processo de arrefecimento é o número mínimo de iterações em cada temperatura, n_1 , isto é, o número que define o tamanho da cadeia de Markov.

Como já foi descrito, para um dado valor do parâmetro de controlo, o valor de $\exp(Dc/q)$ do critério de Metropolis, é comparado com um número aleatório entre 0 e 1. Se este número é menor que a exponencial, então a nova solução é aceite, caso contrário é rejeitada. Este processo será repetido, para aquele valor do parâmetro de controlo, um determinado número de vezes, no mínimo n_1 vezes, até a solução já não conseguir ser melhorada (estado quasi-permanente atingido) após o que se procederá à diminuição da temperatura.

Neste trabalho, aquele número é definido da seguinte forma: defini-se um número mínimo de iterações (n_1) que têm de ser feitas obrigatoriamente e ao fim das quais se avalia o custo ótimo em relação ao encontrado anteriormente e o custo médio das n_1 iterações, se não houve melhoramento a temperatura diminui. Caso contrário, as iterações continuam àquela temperatura. Verifica-se, desta forma, que o algoritmo passa mais tempo em temperaturas mais baixas, quando ainda está a trabalhar com soluções longe do ótimo. Este facto contribui para que o algoritmo não caia em ótimos locais.

Relativamente ao critério de paragem deverá ser tal que permita que o algoritmo "perceba" quando é que ainda se está a melhorar a solução e por isso ainda deve continuar a resolução.

Neste sentido, o critério de paragem utilizado nesta dissertação consiste em definir um parâmetro, n_2 , que é o número de patamares de temperatura consecutivos em que não há melhoramento do custo ótimo ou do custo médio.

Em termos práticos, se o algoritmo no n_2-1 patamar de temperatura incrementar a solução então a contagem de n_2 passa a zero e o algoritmo

Slide 9 (Continued)

continua o processo.

Luís Filipe, 20/03/2003

LF48

serve para definir a temperatura inicial. O parâmetro temperatura é um parametro fundamental do algoritmo pois é ela que de certa forma o direcciona.

Luís Filipe, 24/03/2003

LF49

iteração-passagem no critério de metropolis em que se comparam custos e se aceitam com uma dada probabilidade que está relacionada com a temperatura, para temperaturas mais elevadas a aceitação de soluções más é maior, à medida que a temepratura diminui essa probabilidade diminui. De início o algoritmo tem uma visão global do espaço de soluções possíveis mas depois vai-se localizando no sentido de melhorar a solução.

Luís Filipe, 24/03/2003

LF50

A aceitação das soluções é feita segundo uma probabilidade definida pelo chamado critério de Metropolis. Este critério traduz-se em aceitar todas as soluções melhores que a solução anterior e também as que a piorem, com uma probabilidade que é tanto menor quanto maior for a diferença de custo entre a solução que está a ser avaliada e a anterior.

Luís Filipe, 20/03/2003

LF51

Calibração do algoritmo

Luís Filipe, 24/03/2003

Algorithm implementation

- an initial solution should be provided;
- in each iteration, the solution to be analyzed is called the candidate solution; the rearrangements, or procedure for arriving at candidate solutions, has to be established;

LF48

- the development of the algorithm is controlled by parameter **LF49** controlled temperature (the initial value of this parameter is defined); it will decrease during the course of the iterative procedure until a predefined value is reached;
- the cooling schedule whereby the temperatures are lowered, should also be established;

LF51

- the solution will be randomly changed as long as the algorithm develops.

6.4 IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO DO RECOZIMENTO SIMULADO

Um dos aspectos fundamentais na implementação do Recozimento Simulado é a geração de soluções candidatas do problema e com o qual o algoritmo irá trabalhar. Chamam-se soluções possíveis ou candidatas todas as soluções que satisfaçam as restrições impostas pelo problema.

No processo de geração de uma solução candidata é importante o conceito de solução vizinha. Assim, neste contexto, torna-se fundamental introduzir o conceito de vizinhança. Entenda-se por vizinhança, o conjunto de soluções que podem resultar da solução anterior, por pequenas alterações realizadas nesta. Isto é, uma solução s' diz-se fazer parte da vizinhança da solução s se e só se resultou de uma modificação nesta, de tal forma que continue a fazer parte do conjunto de soluções possíveis. O conjunto de soluções vizinhas está contido no conjunto de soluções candidatas.

A vizinhança, é assim, dependente da forma adoptada para gerar soluções candidatas. Para tal não existem regras definidas e rígidas que servem para todos os problemas. Existem, no entanto, regras provenientes da investigação e apontadas na literatura como linhas orientadoras quando se utiliza o algoritmo do Recozimento Simulado, às quais se fará referência seguidamente (REEVES,1993).

Em cada iteração (entenda-se por iteração a passagem de uma solução candidata no teste Metropolis) estão, assim, envolvidos dois processos distintos: a geração da solução candidata e o cálculo do custo que lhe está associado. Ambos os processos deverão ser rápidos e eficientes. Relativamente ao primeiro, a forma como se geram soluções candidatas deve ser tal que, toda a solução deve poder ser gerada a partir da anterior. Isto é, a partir de uma solução, qualquer outra deve ser possível.

Por outro lado, uma vizinhança proveniente de alterações pequenas e simples leva a melhores resultados que vizinhanças resultantes de grandes e complexas alterações. É importante que o algoritmo faça uma pesquisa que cubra com lentidão o domínio de soluções possíveis. No que diz respeito ao segundo, por vezes, é possível não recalculer o custo, associado à nova solução, na íntegra mas analisar e recalculer as partes relativas às quais esta solução veio introduzir alterações.

A primeira solução com a qual o algoritmo vai trabalhar designa-se por solução inicial. Assim, o algoritmo começa por ter de encontrar uma solução inicial que respeite as restrições do problema. Esta escolha da solução inicial é aleatória ainda que possa obedecer a determinadas regras. No entanto, a solução final tem de ser independente da solução inicial.

Relativamente ao processo de arrefecimento são importantes quatro aspectos. Um deles prende-se com a escolha da temperatura inicial. Relembrando a descrição do critério de Metropolis, sendo c a função de custo e S_p o conjunto de soluções possíveis ($s \in S_p$) e estando-se a tratar, por exemplo, de um problema de minimização, gerada aleatoriamente uma solução candidata, s' , de custo $c(s')$, a partir da solução s , a transição de s para s' vai ser realizada com probabilidade $p = \min\{1, \exp(Dc/q)\}$, em que $Dc = c(s) - c(s')$, sendo q o valor do parâmetro de controlo.

Ora, como facilmente se observa pela expressão de Metropolis, pretende-se que inicialmente q seja suficientemente elevado para que mesmo soluções muito negativas sejam aceites. Isto é, o valor inicial de q deve ser escolhido de tal forma que permita que todo o espaço de soluções seja verificado.

A expressão utilizada para o cálculo da temperatura inicial, na presente dissertação, é a seguinte (CUNHA, 1999, CUNHA e SOUSA, 2001):

$$(6.1)$$

Slide 10 (Continued)

onde c_0 representa o custo da solução inicial e a é a elasticidade de aceitação que se define como sendo a probabilidade de aceitação de uma solução cujo custo é superior ao da solução inicial de uma dada percentagem. Com esta expressão o algoritmo calcula uma temperatura tal que, inicialmente, é aceite uma percentagem de soluções com probabilidade igual a a cujo custo é superior em 10 % ao da solução inicial. Relativamente ao valor de a é necessário que este seja suficientemente elevado, para permitir uma aceitação inicial de soluções que cubra todo o espaço de soluções possíveis. Analisando o critério de Metropolis verifica-se que tal só é possível com um valor de temperatura inicial elevado. Kirkpatrick sugeriu que os valores anteriores fossem definidos de forma a garantir uma taxa de aceitação inicial (número de soluções aceites no critério de Metropolis/ número de soluções candidatas) de 80 %. Nestas condições, com uma temperatura inicial elevada, a aceitação de uma nova solução é quase imediata e a solução final tornar-se-á independente da final.

Posteriormente, tem de ser definida a forma como o parâmetro q vai ser reduzido. Na presente dissertação este arrefecimento é feito gradualmente segundo a seguinte expressão (arrefecimento geométrico):

$$, \quad (6.2)$$

O parâmetro r designa-se por taxa ou coeficiente de arrefecimento e é graças a ele que se processa a diminuição do parâmetro de controlo. Se o seu valor for muito elevado significa que se arrefece muito devagar e se testam muitos patamares de temperatura o que implica um aumento no tempo de resolução. Se r tomar um valor mais baixo arrefece-se mais rápido, "esquecem-se" alguns valores de temperatura mas o tempo de resolução é menor. Na presente dissertação este parâmetro toma um valor constante, isto é ao longo do algoritmo não varia embora existam implementações do Recozimento Simulado em que este parâmetro vai variando ao longo da execução do algoritmo.

Outro parâmetro envolvido no processo de arrefecimento é o número mínimo de iterações em cada temperatura, n_1 , isto é, o número que define o tamanho da cadeia de Markov.

Como já foi descrito, para um dado valor do parâmetro de controlo, o valor de $\exp(Dc/q)$ do critério de Metropolis, é comparado com um número aleatório entre 0 e 1. Se este número é menor que a exponencial, então a nova solução é aceite, caso contrário é rejeitada. Este processo será repetido, para aquele valor do parâmetro de controlo, um determinado número de vezes, no mínimo n_1 vezes, até a solução já não conseguir ser melhorada (estado quasi-permanente atingido) após o que se procederá à diminuição da temperatura.

Neste trabalho, aquele número é definido da seguinte forma: defini-se um número mínimo de iterações (n_1) que têm de ser feitas obrigatoriamente e ao fim das quais se avalia o custo óptimo em relação ao encontrado anteriormente e o custo médio das n_1 iterações, se não houve melhoramento a temperatura diminui. Caso contrário, as iterações continuam àquela temperatura. Verifica-se, desta forma, que o algoritmo passa mais tempo em temperaturas mais baixas, quando ainda está a trabalhar com soluções longe do óptimo. Este facto contribui para que o algoritmo não caia em óptimos locais.

Relativamente ao critério de paragem deverá ser tal que permita que o algoritmo "perceba" quando é que ainda se está a melhorar a solução e por isso ainda deve continuar a resolução.

Neste sentido, o critério de paragem utilizado nesta dissertação consiste em definir um parâmetro, n_2 , que é o número de patamares de temperatura consecutivos em que não há melhoramento do custo óptimo ou do custo médio.

Em termos práticos, se o algoritmo no n_2-1 patamar de temperatura incrementar a solução então a contagem de n_2 passa a zero e o algoritmo

Slide 10 (Continued)

continua o processo.

Luís Filipe, 20/03/2003

LF48

serve para definir a temperatura inicial. O parâmetro temperatura é um parametro fundamental do algoritmo pois é ela que de certa forma o direcciona.

Luís Filipe, 24/03/2003

LF49

iteração-passagem no critério de metropolis em que se comparam custos e se aceitam com uma dada probabilidade que está relacionada com a temperatura, para temperaturas mais elevadas a aceitação de soluções más é maior, à medida que a temepratura diminui essa probabilidade diminui. De início o algoritmo tem uma visão global do espaço de soluções possíveis mas depois vai-se localizando no sentido de melhorar a solução.

Luís Filipe, 24/03/2003

LF50

A aceitação das soluções é feita segundo uma probabilidade definida pelo chamado critério de Metropolis. Este critério traduz-se em aceitar todas as soluções melhores que a solução anterior e também as que a piorem, com uma probabilidade que é tanto menor quanto maior for a diferença de custo entre a solução que está a ser avaliada e a anterior.

Luís Filipe, 20/03/2003

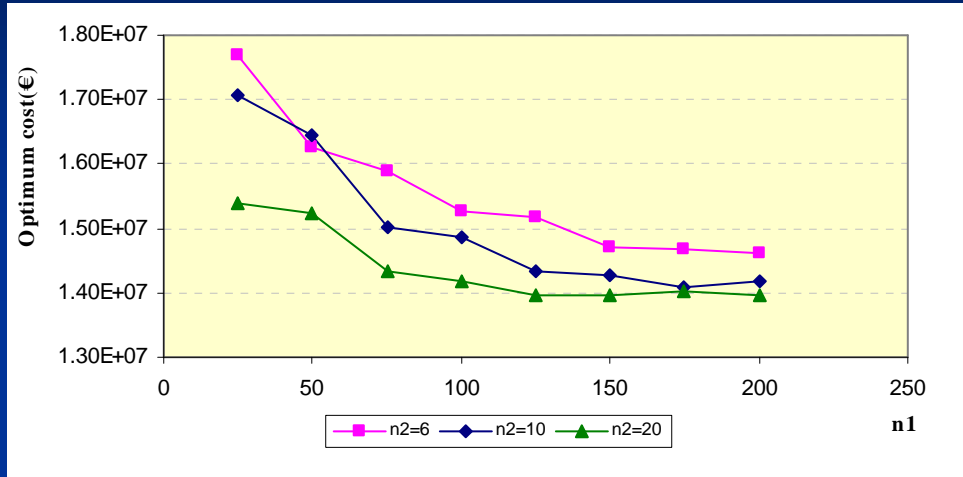
LF51

Calibração do algoritmo

Luís Filipe, 24/03/2003

LF47

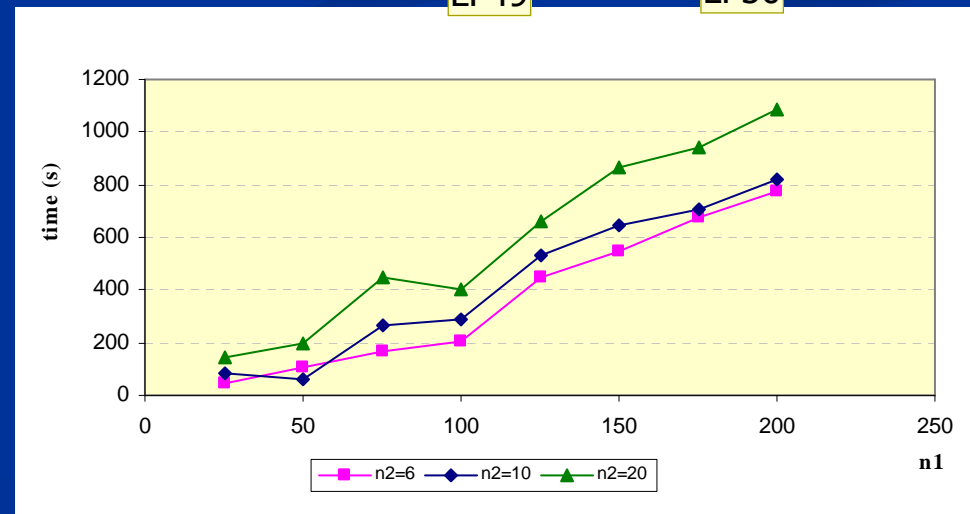
Algorithm implementation



LF48

LF49

LF50



LF51

6.4 IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO DO RECOZIMENTO SIMULADO

Um dos aspectos fundamentais na implementação do Recozimento Simulado é a geração de soluções candidatas do problema e com o qual o algoritmo irá trabalhar. Chamam-se soluções possíveis ou candidatas todas as soluções que satisfaçam as restrições impostas pelo problema.

No processo de geração de uma solução candidata é importante o conceito de solução vizinha. Assim, neste contexto, torna-se fundamental introduzir o conceito de vizinhança. Entenda-se por vizinhança, o conjunto de soluções que podem resultar da solução anterior, por pequenas alterações realizadas nesta. Isto é, uma solução s' diz-se fazer parte da vizinhança da solução s se e só se resultou de uma modificação nesta, de tal forma que continue a fazer parte do conjunto de soluções possíveis. O conjunto de soluções vizinhas está contido no conjunto de soluções candidatas.

A vizinhança, é assim, dependente da forma adoptada para gerar soluções candidatas. Para tal não existem regras definidas e rígidas que servem para todos os problemas. Existem, no entanto, regras provenientes da investigação e apontadas na literatura como linhas orientadoras quando se utiliza o algoritmo do Recozimento Simulado, às quais se fará referência seguidamente (REEVES,1993).

Em cada iteração (entenda-se por iteração a passagem de uma solução candidata no teste Metropolis) estão, assim, envolvidos dois processos distintos: a geração da solução candidata e o cálculo do custo que lhe está associado. Ambos os processos deverão ser rápidos e eficientes. Relativamente ao primeiro, a forma como se geram soluções candidatas deve ser tal que, toda a solução deve poder ser gerada a partir da anterior. Isto é, a partir de uma solução, qualquer outra deve ser possível.

Por outro lado, uma vizinhança proveniente de alterações pequenas e simples leva a melhores resultados que vizinhanças resultantes de grandes e complexas alterações. É importante que o algoritmo faça uma pesquisa que cubra com lentidão o domínio de soluções possíveis. No que diz respeito ao segundo, por vezes, é possível não recalculer o custo, associado à nova solução, na íntegra mas analisar e recalculer as partes relativas às quais esta solução veio introduzir alterações.

A primeira solução com a qual o algoritmo vai trabalhar designa-se por solução inicial. Assim, o algoritmo começa por ter de encontrar uma solução inicial que respeite as restrições do problema. Esta escolha da solução inicial é aleatória ainda que possa obedecer a determinadas regras. No entanto, a solução final tem de ser independente da solução inicial.

Relativamente ao processo de arrefecimento são importantes quatro aspectos. Um deles prende-se com a escolha da temperatura inicial. Relembrando a descrição do critério de Metropolis, sendo c a função de custo e S_p o conjunto de soluções possíveis ($s \in S_p$) e estando-se a tratar, por exemplo, de um problema de minimização, gerada aleatoriamente uma solução candidata, s' , de custo $c(s')$, a partir da solução s , a transição de s para s' vai ser realizada com probabilidade $p = \min\{1, \exp(Dc/q)\}$, em que $Dc = c(s) - c(s')$, sendo q o valor do parâmetro de controlo.

Ora, como facilmente se observa pela expressão de Metropolis, pretende-se que inicialmente q seja suficientemente elevado para que mesmo soluções muito negativas sejam aceites. Isto é, o valor inicial de q deve ser escolhido de tal forma que permita que todo o espaço de soluções seja verificado.

A expressão utilizada para o cálculo da temperatura inicial, na presente dissertação, é a seguinte (CUNHA, 1999, CUNHA e SOUSA, 2001):

$$(6.1)$$

Slide 11 (Continued)

onde c_0 representa o custo da solução inicial e a é a elasticidade de aceitação que se define como sendo a probabilidade de aceitação de uma solução cujo custo é superior ao da solução inicial de uma dada percentagem. Com esta expressão o algoritmo calcula uma temperatura tal que, inicialmente, é aceite uma percentagem de soluções com probabilidade igual a a cujo custo é superior em 10 % ao da solução inicial. Relativamente ao valor de a é necessário que este seja suficientemente elevado, para permitir uma aceitação inicial de soluções que cubra todo o espaço de soluções possíveis. Analisando o critério de Metropolis verifica-se que tal só é possível com um valor de temperatura inicial elevado. Kirkpatrick sugeriu que os valores anteriores fossem definidos de forma a garantir uma taxa de aceitação inicial (número de soluções aceites no critério de Metropolis/ número de soluções candidatas) de 80 %. Nestas condições, com uma temperatura inicial elevada, a aceitação de uma nova solução é quase imediata e a solução final tornar-se-á independente da final.

Posteriormente, tem de ser definida a forma como o parâmetro q vai ser reduzido. Na presente dissertação este arrefecimento é feito gradualmente segundo a seguinte expressão (arrefecimento geométrico):

$$, \quad (6.2)$$

O parâmetro r designa-se por taxa ou coeficiente de arrefecimento e é graças a ele que se processa a diminuição do parâmetro de controlo. Se o seu valor for muito elevado significa que se arrefece muito devagar e se testam muitos patamares de temperatura o que implica um aumento no tempo de resolução. Se r tomar um valor mais baixo arrefece-se mais rápido, "esquecem-se" alguns valores de temperatura mas o tempo de resolução é menor. Na presente dissertação este parâmetro toma um valor constante, isto é ao longo do algoritmo não varia embora existam implementações do Recozimento Simulado em que este parâmetro vai variando ao longo da execução do algoritmo.

Outro parâmetro envolvido no processo de arrefecimento é o número mínimo de iterações em cada temperatura, n_1 , isto é, o número que define o tamanho da cadeia de Markov.

Como já foi descrito, para um dado valor do parâmetro de controlo, o valor de $\exp(Dc/q)$ do critério de Metropolis, é comparado com um número aleatório entre 0 e 1. Se este número é menor que a exponencial, então a nova solução é aceite, caso contrário é rejeitada. Este processo será repetido, para aquele valor do parâmetro de controlo, um determinado número de vezes, no mínimo n_1 vezes, até a solução já não conseguir ser melhorada (estado quasi-permanente atingido) após o que se procederá à diminuição da temperatura.

Neste trabalho, aquele número é definido da seguinte forma: definiu-se um número mínimo de iterações (n_1) que têm de ser feitas obrigatoriamente e ao fim das quais se avalia o custo ótimo em relação ao encontrado anteriormente e o custo médio das n_1 iterações, se não houve melhoramento a temperatura diminui. Caso contrário, as iterações continuam àquela temperatura. Verifica-se, desta forma, que o algoritmo passa mais tempo em temperaturas mais baixas, quando ainda está a trabalhar com soluções longe do ótimo. Este facto contribui para que o algoritmo não caia em ótimos locais.

Relativamente ao critério de paragem deverá ser tal que permita que o algoritmo "perceba" quando é que ainda se está a melhorar a solução e por isso ainda deve continuar a resolução.

Neste sentido, o critério de paragem utilizado nesta dissertação consiste em definir um parâmetro, n_2 , que é o número de patamares de temperatura consecutivos em que não há melhoramento do custo ótimo ou do custo médio.

Em termos práticos, se o algoritmo no n_2-1 patamar de temperatura incrementar a solução então a contagem de n_2 passa a zero e o algoritmo

Slide 11 (Continued)

continua o processo.

Luís Filipe, 20/03/2003

LF48

serve para definir a temperatura inicial. O parâmetro temperatura é um parametro fundamental do algoritmo pois é ela que de certa forma o direcciona.

Luís Filipe, 24/03/2003

LF49

iteração-passagem no critério de metropolis em que se comparam custos e se aceitam com uma dada probabilidade que está relacionada com a temperatura, para temperaturas mais elevadas a aceitação de soluções más é maior, à medida que a temepratura diminui essa probabilidade diminui. De início o algoritmo tem uma visão global do espaço de soluções possíveis mas depois vai-se localizando no sentido de melhorar a solução.

Luís Filipe, 24/03/2003

LF50

A aceitação das soluções é feita segundo uma probabilidade definida pelo chamado critério de Metropolis. Este critério traduz-se em aceitar todas as soluções melhores que a solução anterior e também as que a piorem, com uma probabilidade que é tanto menor quanto maior for a diferença de custo entre a solução que está a ser avaliada e a anterior.

Luís Filipe, 20/03/2003

LF51

Calibração do algoritmo

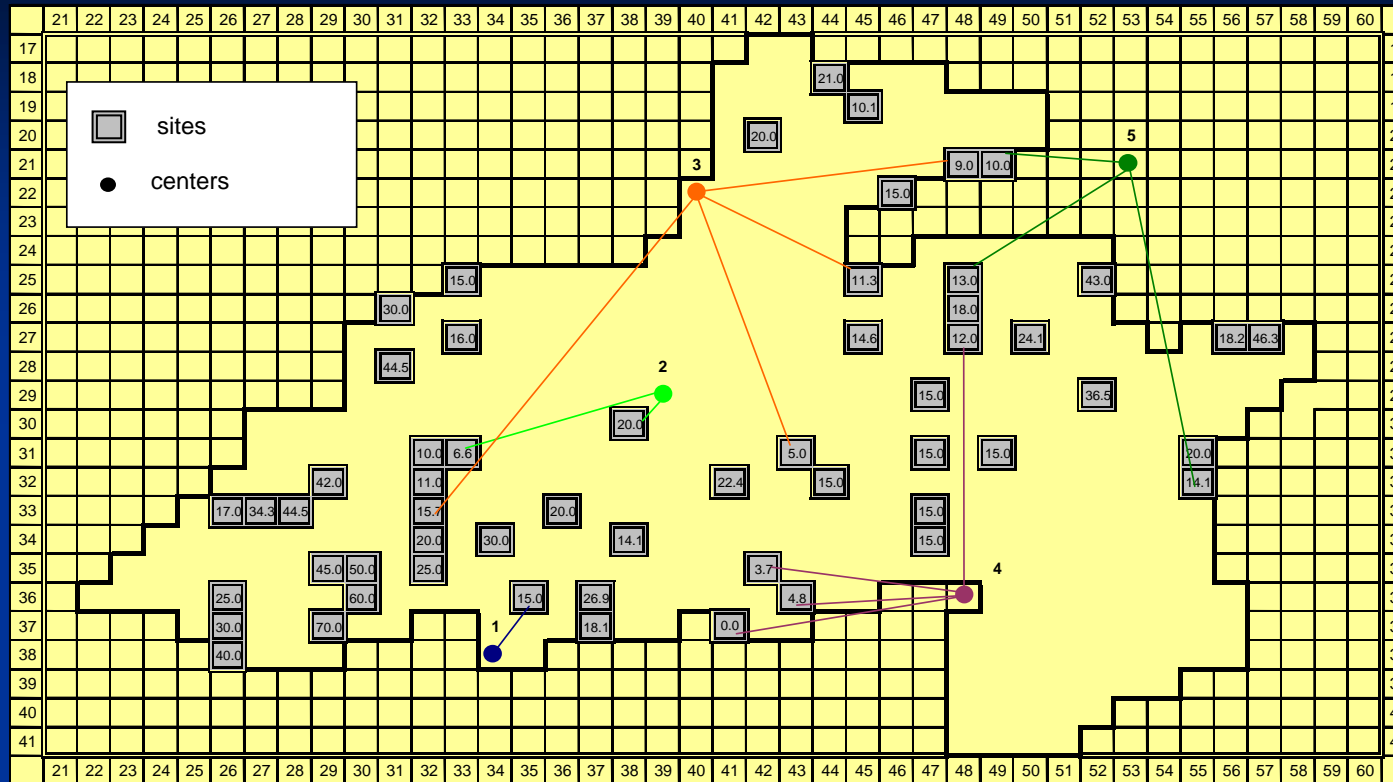
Luís Filipe, 24/03/2003

Optimal Solution

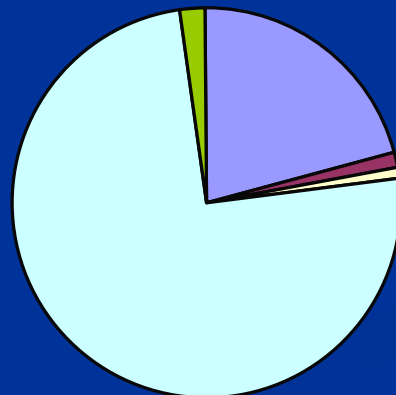
LF23

LF4

LF24



LF25



- Capital costs for pipes
- Capital costs for wells
- Capital costs for pumps
- Energy costs
- Maintenance costs

Slide 12

LF4

a=0.9;
n1=125;
r=0.2;
n2=20;
tempo de resolução: \approx 12 minutos

Luís Filipe, 18/02/2003

LF23

Esta solução designar-se-á por solução óptima e o custo que lhe está associado por custo óptimo. No entanto, aquela designação não significa necessariamente solução óptima global, mas sim solução que passou por um processo de optimização e que até ao momento é a melhor solução encontrada. Pois como se referiu anteriormente, só sob determinadas condições, difíceis de verificar na prática, é que é possível garantir o encontro de uma solução óptima global com o método do Recozimento Simulado.

Apresentado o problema, bem como, os dados disponíveis para a sua resolução, escolhe-se a solução inicial e geram-se, a partir desta, as soluções candidatas. Faz-se a avaliação de qual a importância da escolha da solução inicial na solução final e no tempo de resolução e também qual o esquema de vizinhança que produz melhores resultados fazendo, mais uma vez, o balanço entre o custo óptimo e o tempo de resolução.

Luís Filipe, 19/02/2003

LF24

A calibração dos parâmetros tem como objectivo encontrar os seus melhores valores e a sua melhor conjugação, por forma a obter uma solução satisfatória quer em termos de custo mínimo, quer em termos de tempo de resolução.

Para tal é importante que o programa computacional utilizado seja robusto. Esta robustez revela-se na independência, por parte do algoritmo, do conjunto de números aleatórios utilizado. Para cada simulação foram realizadas trinta execuções do programa computacional sendo que, em cada execução, o programa gera uma raiz de números aleatórios distinta.

Verificou-se que entre essas trinta execuções, se chegou, na grande maioria das vezes, à mesma solução.

Luís Filipe, 19/02/2003

LF25

Relativamente aos melhores valores para os parâmetros intervenientes no processo de arrefecimento e fazendo um balanço entre solução de custo mínimo e tempo de resolução, chegou-se, no caso presente, ao seguinte: elasticidade de aceitação, a=0.9; número mínimo de iterações em cada temperatura, n1=125; factor de arrefecimento, r=0.2; número de patamares de temperatura em que não existe incremento do óptimo ou da sua média, n2=20. Verifica-se que para valores superiores ao indicado para n1, a solução pouco ou nada melhora, o seu incremento apenas faz aumentar o tempo de resolução. Relativamente ao parâmetro n2, constata-se que, com aquele valor, o algoritmo termina com uma percentagem de aceitação (número de soluções que são aceites no critério de Metropolis/número de soluções candidatas) de cerca de 5 % e que se for incrementado as soluções também não melhoram.

Com estes valores o tempo de resolução é de cerca de 12 minutos e o custo associado é de

1.298E+07 euros, distribuindo-se da seguinte forma pelas várias componentes: o custo de investimento representa cerca de 23.2 % do custo total, o custo de exploração cerca de 74.6 % e o custo de manutenção cerca de 2.2 %

Luís Filipe, 19/02/2003

Slide 13

LF46

Luís Filipe 19-02-2003

Luís Filipe 19-02-2003

solução D da tese - Seguindo a mesma linha de raciocínio, outro exemplo que se analisou, foi o da Solução D. A solução óptima para a cidade 3 elegeu a captação 16 tendo disponíveis captações muito mais próximas do aglomerado. De facto, aquela solução leva a captação 16 até ao seu limite de caudal, não havendo nenhuma captação com tanta capacidade nas redondezas. Para extrair o mesmo caudal que retira à captação 16, a solução seria abrir um maior número de captações ainda que mais próximas do aglomerado populacional. Na Solução D, a captação 16 é substituída pelas captações 31 e 35 sendo o somatório dos caudais bombados nestas captações igual ao bombado na captação 16.

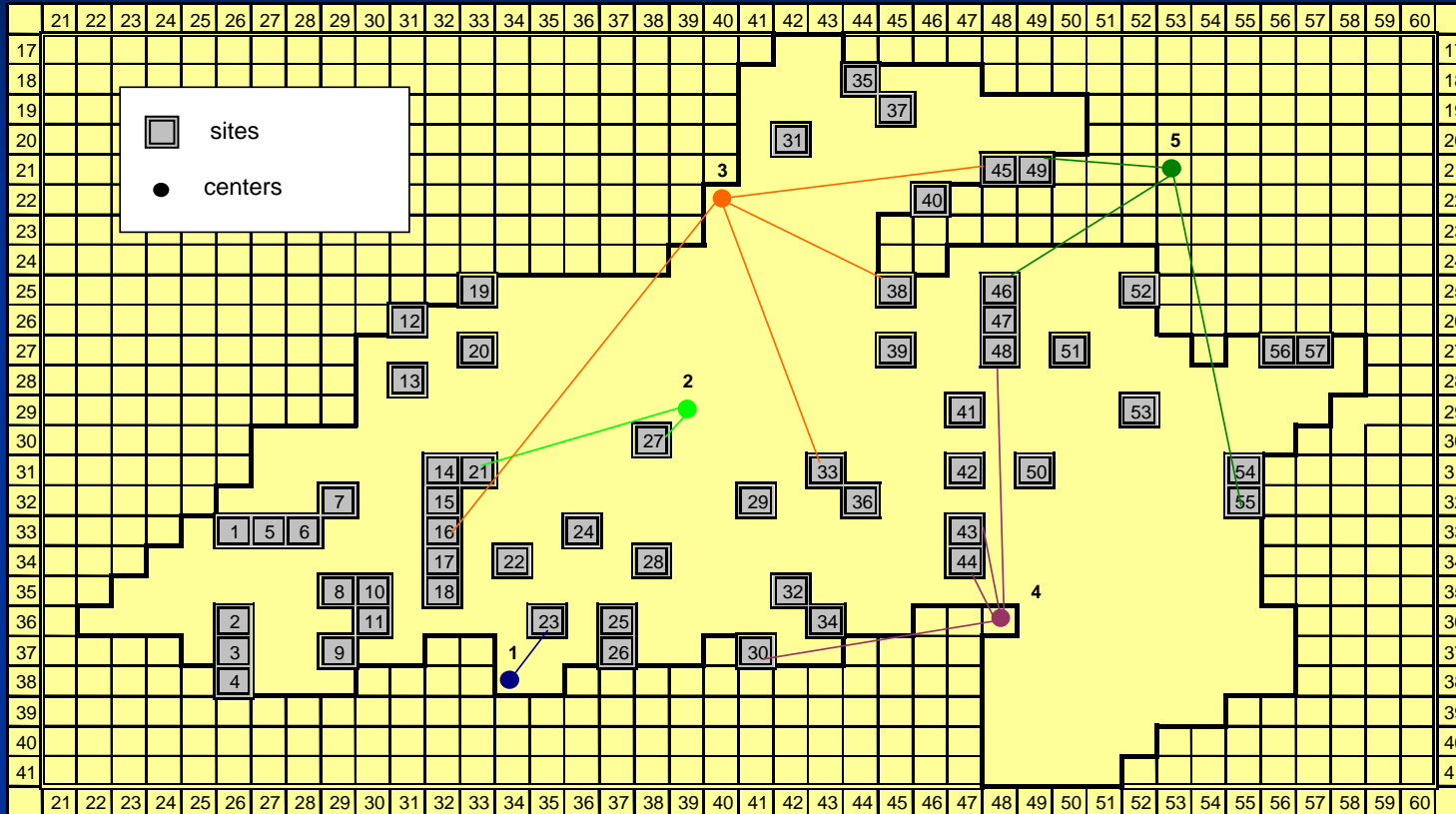
A diferença, entre as duas soluções reside no custo do equipamento electromecânico e no custo de exploração cujo aumento não é compensado com a diminuição do custo de investimento nas condutas. Uma vez mais, o algoritmo opta por uma solução em que é aberta apenas uma captação com uma maior capacidade, ainda que para isso se tenha de percorrer uma maior distância.

Verificou-se que, se em vez de retirar caudal da célula 35 como é contemplado na Solução C, se retirasse o mesmo caudal da célula 37 ou da célula 40 não se originavam soluções pertencentes ao espaço de soluções possíveis para o problema. A restrição dos rebaixamentos máximos entrava em rotura. De facto, se se observarem os coeficientes de influência das células 37 e 40 constantes na Matriz dos Coeficientes de Influência (MIGLIARI e LOBO-FERREIRA, 1997) verifica-se que tomam valores elevados.

Luís Filipe, 24/03/2003

Optimal Solution /Other solutions

LF27



Slide 14

LF27

solução E da tese- Analise-se agora a Solução E. Esta solução, relativamente à cidade 4, contempla as captações 32 e 34 que têm profundidades muito elevadas, 262 e 302 m respectivamente, em vez das captações 43 e 44 que são muito menos profundas, com 90 m de profundidade cada uma, mas que, em contrapartida, têm níveis estáticos iniciais muito baixos.

Estas novas captações são mais próximas do aglomerado populacional e muito menos profundas, e conseqüentemente os custos de investimento, quer nas condutas, quer na elaboração das captações são menores. Mas a diminuição destes custos é mais uma vez superada pelo aumento dos custos de exploração. De facto, embora a diferença dos níveis estáticos iniciais entre as captações 32 e 34 e as captações 43 e 44, não seja suficiente para aumentar os custos do equipamento electromecânico, tal diferença vai reflectir-se, uma vez mais, nos custos de exploração.

Luis Filipe, 24/03/2003

Conclusions

- Operation costs are the most important part of total cost.
- Static levels and drawdowns are crucial for defining the best location of wells.
- Optimal solutions make the economies of scale aparent .
- Simulated annealing algorithm shows its ability to cope with the combinatorial characteristics of the optimization model.

LF29

LF30

LF28

LF28

Para cada simulação foram realizadas trinta execuções do programa computacional sendo que, em cada execução, o programa gera uma raiz de números aleatórios distinta.

Verifica-se que entre essas trinta execuções, quatro soluções em média representam um custo diferente do apresentado (apresentando um desvio médio de 0.2 % em relação à solução ótima apresentada). Sendo que, nas restantes, se chega sempre à mesma solução.

De facto, o Recozimento Simulado é um método que tem uma forte componente aleatória. O algoritmo apresentado recorre a números aleatórios no encontro da solução inicial ou seja, cada execução do programa é inicializada partindo de uma solução diferente.

Por outro lado, também a geração de soluções candidatas tem uma componente aleatória, uma vez que, como já foi referido é gerado um número com base no qual o algoritmo vai optar por um tipo de geração, dos quatro tipos apresentados.

O algoritmo recorre ainda a números aleatórios quando utiliza o critério de Metropolis.

Esta forte componente aleatória do algoritmo justifica os desvios de algumas soluções. No entanto, os resultados apresentados são bastante satisfatórios comprovando a robustez do programa computacional.

Luís Filipe, 19/02/2003

LF29

Verificou-se que o custo de exploração é o que apresenta uma maior percentagem no custo final, sendo a escolha das captações bastante vinculada por este facto. Um maior custo de investimento, quer por se percorrerem grandes distâncias, quer por terem de se atingir grandes profundidades é justificado, muitas vezes, pela economia nos custos de exploração. O algoritmo opta por tirar partido da economia de escala, isto é, prefere abrir uma captação de grande capacidade ainda que isso incremente o custo de investimento, do que abrir várias captações que depois, no seu conjunto, acabam por aumentar os gastos de energia.

Luís Filipe, 19/02/2003

LF30

O nível estático inicial bem como os coeficientes de influências revelaram-se factores de grande importância na escolha de uma dada célula para abrir uma captação, uma vez que ambos entram na contabilização da altura de elevação das bombas e portanto no cálculo das potências hidráulicas e conseqüentemente nos custos de energia.

Luís Filipe, 19/02/2003