

## **PROCESSO EVOLUTIVO DIRECCIONADO**

### **Uma metodologia de optimização para a resolução de problemas que envolvam a simulação do comportamento de sistemas físicos**

**Júlio F. Ferreira da Silva**

*Doutor em Engenharia Civil - Hidráulica Prof. Auxiliar do Departamento de Eng<sup>o</sup> Civil da Universidade do Minho,  
Azurém 4800-058 Guimarães, Portugal 253510200, juliofs@civil.uminho.pt*

#### **RESUMO**

O processo evolutivo direccionado desenvolvido procura as melhores políticas de gestão de sistemas físicos por fases. Associam-se em cascata métodos de optimização (gradiente e algoritmos genéticos) e de simulação do comportamento desses sistemas. As melhores soluções duma fase são usadas como soluções iniciais da seguinte. Aplica-se a metodologia à gestão de sistemas de abastecimento de água.

**Palavras-chave** - Optimização global. Metodologia de Optimização-Simulação.

#### **1. INTRODUÇÃO**

Os problemas relacionados com o planeamento e a gestão de sistemas físicos reais caracterizam-se pela elevada dimensão, sendo necessário recorrer a diversas ferramentas específicas para simular o comportamento das diversas componentes do sistema global face às eventuais soluções geradas pela técnica de optimização no processo de procura da melhor. A simulação do comportamento dos sistemas físicos, só por si, pode ser uma tarefa demorada. A técnica de optimização necessita de chamar estes subprogramas de simulação diversas vezes, pelo que mesmo utilizando computadores com grande capacidade de cálculo, a obtenção de uma solução em tempo útil pode tardar. É fácil encontrar nos relatos de investigações referências a tempos de execução de dias para a resolução de problemas relativos a sistemas simples, de interesse académico. A resolução de casos reais torna-se, muitas vezes, proibitiva. A associação em cascata de métodos de optimização (método de gradiente e algoritmos genéticos) e de simulação dos sistemas físicos permite o aproveitamento das distintas características de cada uma das ferramentas.

Neste artigo descrever-se-á a metodologia designada por processo evolutivo direccionado e sua aplicação à definição das políticas para o planeamento e a gestão de sistemas físicos.

#### **2. DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA DESENVOLVIDA**

A estratégia desenvolvida trata o processo de procura das melhores políticas adoptando uma perspectiva multi-escala, ou seja, defende-se que o problema pode ser resolvido por fases. Numa primeira etapa interessa procurar de forma rápida eventuais soluções (que designaremos soluções preliminares) e em fases posteriores aquelas soluções preparatórias poderão ser apuradas usando modelos mais rigorosos e exigentes.

A divisão espacial do domínio dos sistemas físicos pode ser realizado de acordo a fase de estudo. Numa primeira etapa interessa encontrar eventuais soluções nos pontos que se pretende

controlar os sistemas físicos, os designados pontos de controlo, e numa segunda etapa poder-se-á caracterizar com maior minúcia o estado do sistema em todos os nós numa malha fina. A definição da malha para a modelação matemática / numérica de dado sistema físico deve atender a alguns princípios, sendo os mais significativos: a discretização deve representar de forma fidedigna o domínio e os maiores gradientes da equação característica do fenómeno devem ficar adequadamente representados. A escolha do tipo de elementos e da sua ordem deve orientar-se pelo respeito do rigor exigido aos resultados e pelo respectivo custo computacional que lhe está associado. No entanto, a definição do número de elementos e de nós tem, também, implicações no tempo de execução. Uma abordagem racional e sistémica atenderá em primeiro lugar ao que é pretendido. O objectivo do modelo global de optimização - simulação é definir as melhores políticas de planeamento e de gestão e não conhecer minuciosamente o fenómeno físico em análise.

Os modelos numéricos são, muitas vezes, validados comparando os seus resultados com as soluções analíticas conhecidas. Estas soluções, embora possam traduzir-se por uma equação não-linear são relativamente mais fáceis de calcular, pelo que constituem as primeiras candidatas a ser utilizadas na primeira fase da metodologia defendida. Nos casos em que não seja possível usar soluções analíticas então poder-se-á recorrer às técnicas de identificação de sistemas não-lineares para a definição de modelos de resposta (ou funções de aproximação) dos sistemas físicos face a alteração das variáveis de decisão. Estas funções de resposta poderão ser definidas a partir dos resultados das corridas prévias do modelo de gestão. Tratando estes resultados com adequadas ferramentas da estatística é possível obter expressões que podem ser usadas como funções de aproximação.

A primeira etapa do processo de procura da melhor solução consiste na aplicação de uma ferramenta de optimização que disponibilize rapidamente soluções. De entre as ferramentas disponíveis encontram-se os métodos baseados no conceito de gradiente. No entanto, o problema em questão não é de fácil resolução, sobretudo se existirem diversos pontos de observação ou de controlo, pelo que uma das estratégias possíveis será o de usar diversos pontos de partida. As soluções encontradas nesta fase inicial farão parte de um conjunto de soluções iniciais da fase seguinte, cuja técnica de optimização empregue são os Algoritmos Genéticos. Em Ferreira da Silva (2003 e 2005) é descrito e aplicado um algoritmo genético desenvolvido especificamente para funcionar em associação com modelos de simulação de sistemas físicos. Neste algoritmo as soluções geradas aleatoriamente são rectificadas por uma metodologia que direcciona as alterações para soluções que atendem ao critério económico e às necessidades de controlo do fenómeno do sistema físico em análise.

Uma possibilidade para se estudar os efeitos da variação dos elementos base nas políticas de utilização de sistemas físicos é proceder à geração, através do método de Monte Carlo, de um número elevado de valores de determinado parâmetro em análise. No algoritmo desenvolvido para a definição de soluções iniciais na técnica de optimização é retida a melhor solução encontrada pelo modelo de gestão para uma simulação estocástica imediatamente anterior.

Na figura 1 estão esquematizadas as diversas componentes dum modelo global de optimização-simulação e de apoio à decisão, bem como o relacionamento das técnicas de optimização com os modelos de simulação do comportamento do sistema físico.

### **3. APLICAÇÕES**

Neste item far-se-á a aplicação do processo evolutivo direccionado à gestão dos recursos hídricos costeiros. O objectivo geral consiste na definição de estratégias operacionais que conduzam aos melhores resultados económicos, que garantam as quantidades solicitadas e que mantenham sob controlo a qualidade da água na origem.

A resolução do problema é complexa, devido à sua dimensão e à não linearidade das funções objectivo e de algumas restrições.

Na formulação matemática do problema atendeu-se à maximização de resultados (benefícios menos os custos) e ao controlo da invasão de água salgada, limitando o avanço da cunha salina.

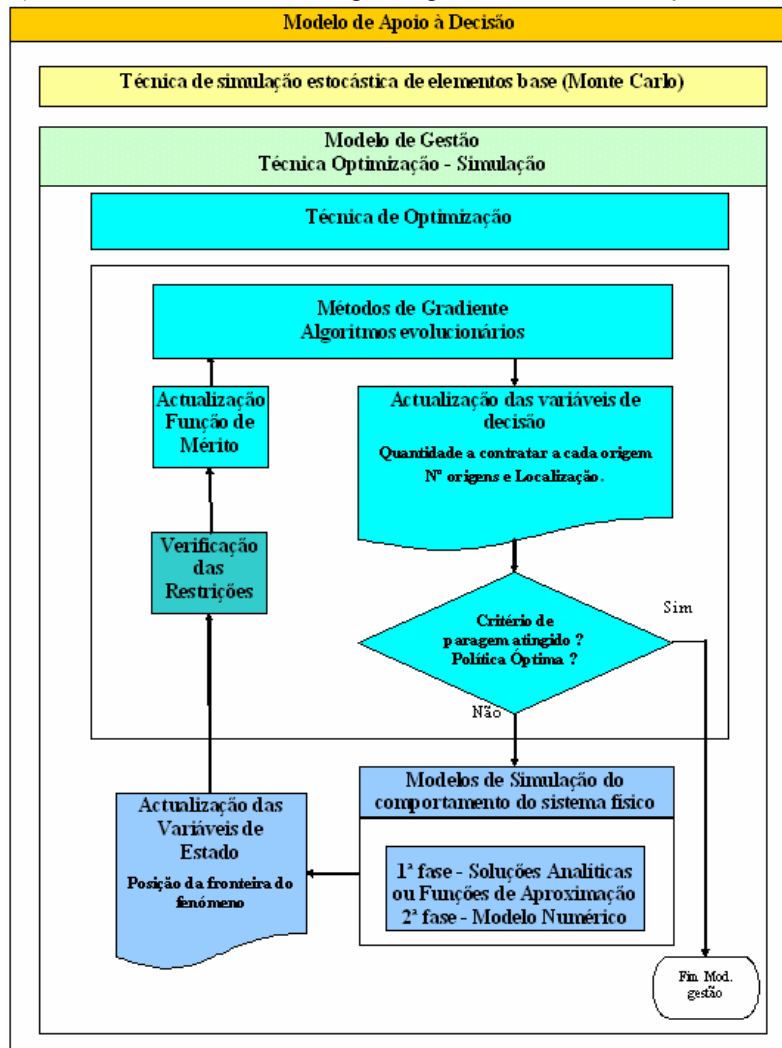


Figura 1 - Esquema do modelo global preconizado

O objectivo é matematicamente representado pela maximização da diferença entre os benefícios e os custos totais na região ao longo do período de análise.

$$\max Z = (B_{total} - C_{total}) \quad (1)$$

sendo:  $B_{total}$  - Total dos Benefícios na região ao longo do período de análise;  $C_{total}$  - Total dos Custos na região ao longo do período de análise.

A caracterização e quantificação completas dos benefícios e custos envolvidos na gestão de sistemas aquíferos do litoral podem ser encontradas em Ferreira da Silva (2002, 2003).

O controlo da intrusão salina no aquífero será realizado impondo um valor máximo para a distância entre do “pé” da interface aos pontos de controlo.

$$(x_{pe})_s \leq (x_{pc})_s - (ds)_s \quad \forall s, \quad s=1,2,\dots,N_{pc} \quad (2)$$

em que:  $(x_{pe})_s$  - Distância do pé da interface a uma linha de referência;  $x_{pc}$  - distância do ponto de controlo à linha de referência;  $ds$  - distância de segurança admissível entre a fronteira e o ponto de controlo;  $N_{pc}$  - número de pontos de controlo.

As outras restrições são:

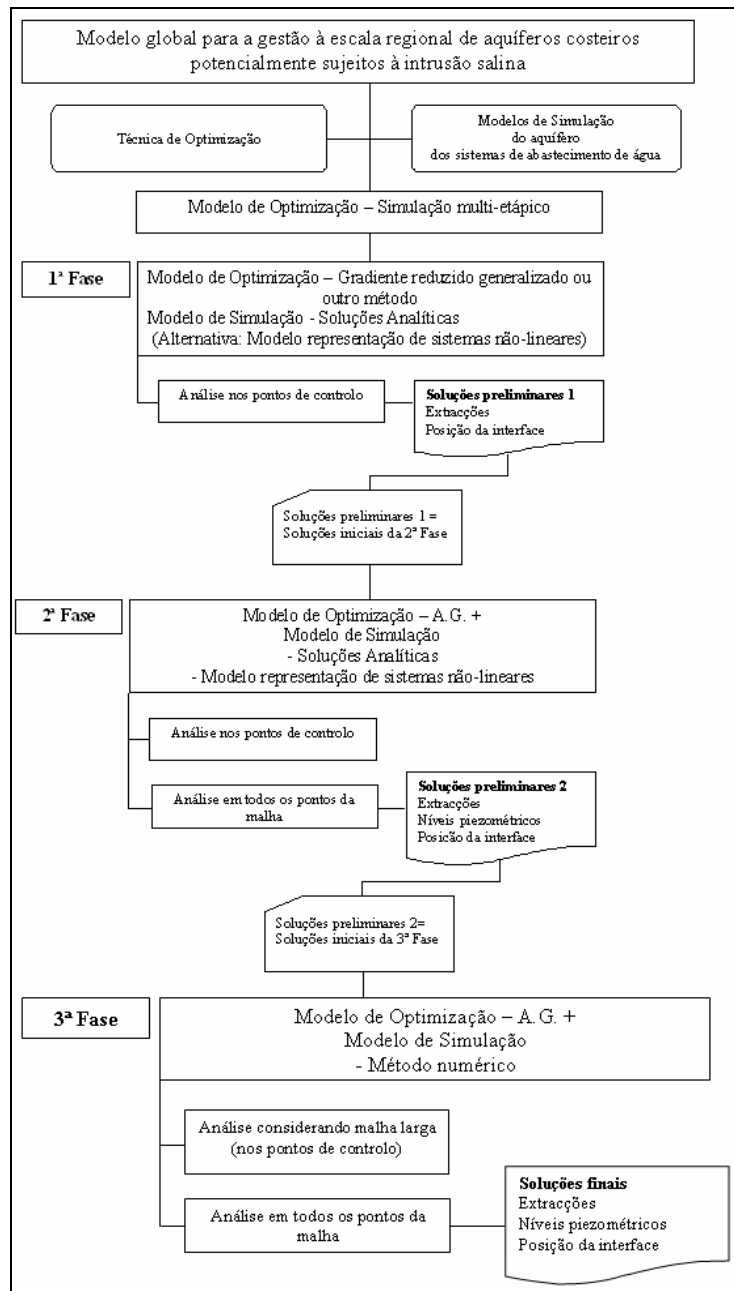
$$\sum Q_i = D \quad i = 1, \dots, (N_s + N_b) \quad (3)$$

$$Q_{i,\min} \leq Q_i \leq Q_{i,\max} \quad i = 1, \dots, (N_s + N_b) \quad (4)$$

$$h_s \geq h_0 \quad s = 1, \dots, N_s \quad (5)$$

em que:  $D$  é a solicitação;  $N_s$  - Número de origens subterrâneas;  $N_b$  - Número de origens superficiais e fornecedores exteriores;  $Q_{i,\min}$  e  $Q_{i,\max}$  os limites de cada origem;  $h_s$  a cota piezométrica na origem  $s$ ;  $h_0$  a cota piezométrica mínima admissível.

Um resumo esquemático da metodologia proposta para o relacionamento dos métodos de otimização com os modelos de simulação da intrusão salina está registado na figura 2.



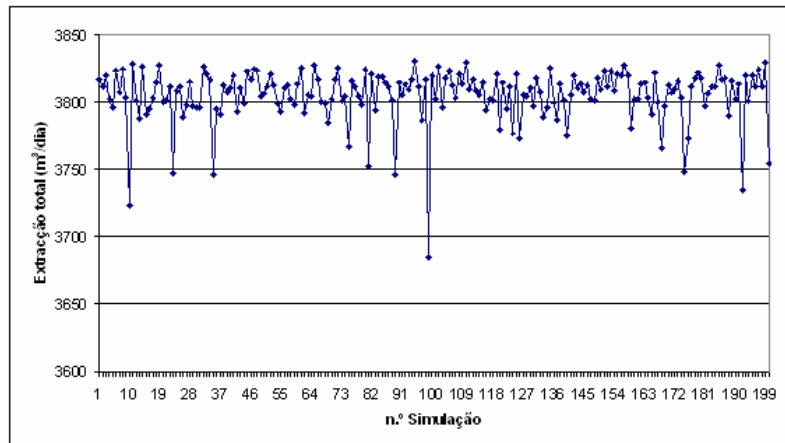
**Figura 2 - Esquema de exemplo de processo evolutivo direccionado**

Usando como problema teste o descrito em Cheng *et al* (2000) a metodologia desenvolvida encontrou soluções semelhantes às apresentadas por aqueles autores, no entanto, os tempos de execução do programa desenvolvido não têm qualquer semelhança com os relatados. A definição da melhor estratégia de extracção para cada distância de segurança é encontrada em poucos segundos.

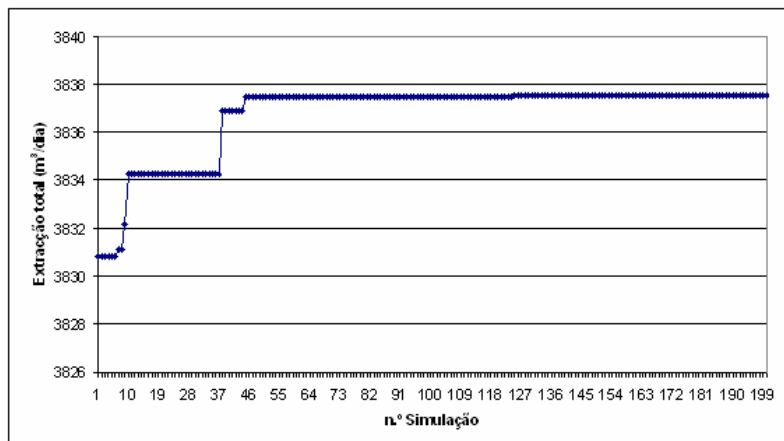
O modelo de gestão desenvolvido considera a possibilidade de poder variar-se os valores da distância de segurança. A experimentação evidenciou que começando os cálculos pelo maior valor admissível para a distância de segurança poder-se-ia aproveitar as soluções da última geração para

pontos de partida do novo processo de procura dos melhores valores das variáveis de decisão para um novo valor da distância de segurança, ao invés do processo se iniciar novamente com recurso a um conjunto de soluções totalmente definidas por processo aleatório. A concretização desta ideia permite a redução dos tempos de execução e reflecte um procedimento exequível, na medida em que à medida que diminuem as distâncias de segurança os valores finais das variáveis de decisão são, muitas vezes, próximos dos valores encontrados para a distância de segurança anterior.

Ao analisar os efeitos da incerteza associada aos custos constatou-se que o algoritmo genético poderia encontrar soluções não expectáveis. Para ilustrar tal comportamento considere-se um problema que consiste na determinação das melhores políticas de utilização de um aquífero onde estão implantadas diversas captações. Para garantir uma determinada distância de segurança aos pontos de controlo não é possível recorrer exclusivamente às captações subterrâneas. Admitindo que o custo da água subterrânea é substancialmente inferior ao do fornecimento de água superficial, então quaisquer que sejam as variações nos custos unitários de exploração das captações subterrâneas, será expectável que a melhor solução seja aquela que permite a máxima extracção, sem que a distância de segurança seja ultrapassada. Ou seja, o critério do controlo da intrusão salina é, neste caso, determinante, relegando para segundo plano os custos. Face ao problema enunciado seria expectável que para as diversas simulações de custos, obtidas pelo método de Monte Carlo, as políticas determinadas pelo modelo de gestão para cada captação apresentassem valores de extracções próximos. No entanto, tal não se verificava o que demonstrava que a ferramenta de optimização teria alguma dificuldade em encontrar as políticas óptimas. Na tentativa de ultrapassar tais dificuldades ter-se-ia que aumentar o número de gerações e o tamanho da população, aumentando os tempos de execução computacional. Tal procedimento não se revelou proveitoso. Em alternativa foi implementada a ideia de reter a melhor solução da simulação anterior para fazer parte do conjunto de pontos de partida para a nova procura, ou seja implementou-se um procedimento que é capaz de recorrer à memória do que aconteceu na simulação anterior. Nas figuras seguintes ilustram-se os resultados do modelo de gestão face a duzentas gerações dos custos de exploração de sete captações.



**Figura 3 - Extracção total versus n.º simulação para número gerações 50 e tamanho população 100 antes da preservação da melhor solução da simulação anterior**



**Figura 4 - Extração total versus n.º simulação para número gerações 50 e tamanho população 100 depois da preservação da melhor solução da simulação anterior**

#### 4. CONCLUSÕES

A experimentação em computador permite-nos afirmar que o processo evolutivo direccionado desenvolvido é eficaz e vantajoso na procura das melhores soluções de gestão de sistemas físicos, isto é, na identificação das soluções que simultaneamente maximizem os resultados económicos e mantenham sob controlo o fenómeno físico em análise. Uma das principais vantagens do processo adoptado consiste no seu desempenho face à dimensão e características não lineares dos problemas. Em situações que envolvam vários pontos de controlo o espaço de procura das eventuais soluções é enorme. Defende-se a resolução do problema adoptando um procedimento multi-etápico. O processo de procura das soluções é direccionado em primeiro lugar para os pontos de decisão ou de controlo e posteriormente são analisados todos os pontos do domínio. Na primeira fase, para a simulação do comportamento do sistema físico são usadas soluções analíticas ou funções de resposta e numa fase posterior os métodos numéricos mais elaborados. Esta metodologia constitui um desenvolvimento na redução dos tempos de execução e, consequentemente, revela-se como uma ferramenta de utilização prática. Resolvendo problemas de teste, o tempo de cálculo da metodologia desenvolvida é substancialmente inferior ao conseguido por outras abordagens divulgadas. Procedendo a uma análise de sensibilidade aos efeitos das variações nos parâmetros base, a preservação da memória dos melhores resultados da simulação anterior permite a afinação progressiva dos valores da melhor solução, robustecendo o procedimento evolutivo direccionado e, simultaneamente, transformando o modelo de gestão numa ferramenta de apoio à decisão.

#### 5. REFERÊNCIAS

- Cheng, A., D. Halhal, A. Naji e D. Ouazar, (2000),: “Pumping Optimization in saltwater-intruded coastal aquifers”, Water Resources Research, Vol 36. n.º 6, pp 2155-2165;
- Ferreira da Silva, Júlio (2002): “Custos de instalação de condutas em sistemas de adução e distribuição de água”, Universidade do Minho;
- Ferreira da Silva, Júlio (2003): “Gestão otimizada à escala regional de sistemas aquíferos potencialmente sujeitos à intrusão salina - Um modelo global para o uso sustentável da água em regiões costeiras”, Dissertação de doutoramento em Engenharia Civil - Hidráulica, Universidade do Minho;
- Ferreira da Silva, Júlio (2005): “GAMO - Um algoritmo genético componente de modelos de gestão (optimização-simulação)”, CEIO, Universidade do Minho;

Michalewicz, Z. (1999): "Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs", Third, revised and extended edition, Springer Verlag, NY.