

**Universidade de Évora**  
**Área Departamental de Ciências Exactas**  
**Departamento de Química**



**Especificação e Prototipação de  
Sistemas de Gestão e Controlo da  
Qualidade da Água de Albufeiras**

por

**Henrique Agostinho de Oliveira Moiteiro Vicente**

Tese submetida à Universidade de Évora para a obtenção do grau de Doutor em  
Química e elaborada sob a orientação do Doutor José Maria dos Santos Arteiro e do  
Professor Doutor José Carlos Ferreira Maia Neves

Évora  
2004

# Especificação e Prototipação de Sistemas de Gestão e Controlo da Qualidade da Água de Albufeiras

Henrique Agostinho de Oliveira Moiteiro Vicente

Departamento de Química

Rua Romão Ramalho, 59

7000-671 Évora

Portugal

hvicente@uevora.pt

Tese submetida à Universidade de Évora para a obtenção do grau de Doutor em  
Química e elaborada sob a orientação do Doutor José Maria dos Santos Arteiro  
e do Professor Doutor José Carlos Ferreira Maia Neves



# Agradecimentos

Deveria enumerar aqui uma lista infindável de pessoas que muito me ajudaram a atingir este objectivo. Seria impossível nomeá-las todas, como gostaria, pois correria sempre o risco de esquecer alguém. No entanto, não posso deixar de fazer referência a algumas delas, agradecendo em particular ao meu orientador, Doutor José Maria dos Santos Arteiro, com o qual tenho o privilégio de trabalhar desde 1993 e que acompanhou o meu trabalho de forma empenhada, ajudando-me, encorajando-me e inculcando-me o espírito de objectividade e clareza necessário a qualquer trabalho académico. Ao Professor Doutor José Carlos Ferreira Maia Neves, do Departamento de Informática da Universidade do Minho, meu co-orientador, a quem devo um agradecimento muito especial pelos ensinamentos que me proporcionou, pela forma incedível como me recebeu e me apoiou, contribuindo decisivamente para que esta dissertação fosse uma realidade. Não posso esquecer o Doutor Manuel Filipe Santos, o Doutor Paulo Cortez, o Mestre Hélder Quintela do Departamento de Sistemas de Informação da Universidade do Minho e o Mestre Rui Tavares do Departamento de Informática da Universidade de Évora pela colaboração, pelo interesse e pela disponibilidade sempre manifestada.

Expresso ainda ao Doutor António Manuel Neto Vaz, Presidente do Conselho do Departamento de Química, o meu agradecimento pela disponibilidade, amizade, apoio e estímulo, bem como pela ajuda na resolução de problemas de natureza burocrática. À Doutora Margarida Figueiredo do Departamento de Química, expresso também o meu agradecimento pelo apoio, encorajamento, interesse, estímulo e amizade. Aos meus colegas do Departamento de Química dirijo um abraço de amizade pelo interesse demonstrado.

Não posso esquecer, e agradecer também a todos os meus amigos e à minha família todo o carinho, apoio, compreensão e amizade.

Por último, quero prestar aqui, a título póstumo, uma sentida homenagem ao Professor Doutor César Augusto Nunes Viana de quem fui aluno e com quem tive o privilégio de trabalhar desde a minha vinda para a Universidade de Évora e que influenciou decisivamente todo o meu percurso académico.



# Especificação e Prototipação de Sistemas de Gestão e Controlo da Qualidade da Água de Albufeiras

## Resumo

É possível re-equacionar os problemas subjacentes à temática da modelação da qualidade da água em albufeiras através de metodologias de resolução de problemas que emanam da Área Científica da Inteligência Artificial, assim como de ferramentas usadas na procura de soluções como as Árvores de Decisão, a Indução de Regras, as Redes Neurais Artificiais e o Raciocínio Simbólico.

O presente trabalho descreve modelos para a previsão da qualidade da água em albufeiras. Um destes modelos fundamenta-se em técnicas de Descoberta de Conhecimento em Bases de Dados, enquanto o outro se baseia no Raciocínio Simbólico. Os sistemas sub-simbólicos apresentam-se como complementares dos sistemas simbólicos, permitindo a partir destes, elaborar sobre sistemas de previsão e/ou simulação do estado futuro da qualidade das águas em albufeiras.

Verificou-se que as fontes de informação na área do ambiente, particularmente no que concerne à qualidade da água em albufeiras, são variadas, heterogéneas e complexas, encontrando-se dispersas por diversas entidades, organismos e instituições. Esta dispersão não só torna difícil definir e caracterizar os problemas como impede a tomada das melhores decisões para os solucionar em tempo útil. Uma solução para este tipo de senãos passa pela integração, difusão e armazenamento desta informação diversificada num corpo único de forma a permitir a partilha de conhecimento com quem efectivamente dele necessita.

Neste trabalho é apresentada uma Agência para a Integração, Difusão e Arquivo de Informação sobre a **QU**alidade da **Á**gua de Albufeiras - **AQUA**. A agência **AQUA** disponibiliza trabalhadores electrónicos inteligentes para tratar uma multitude de tarefas, tais como a comunicação entre os diferentes sub-sistemas, o enviar e receber informação

(e.g. resultados das análises laboratoriais, resultados fornecidos pelos sistemas de aquisição automática de dados, informação relevante sobre as bacias, tais como cartas, levantamentos topográficos, modelos digitais do terreno, fontes de poluição pontual, utilização do solo, dados meteorológicos e climáticos, caracterização geomorfológica), o gerir, guardar e responder a pedidos de informação. A agência **AQUA** é, na sua essência, uma *Data Warehousing* associada a Sistemas MultiAgente. O objectivo principal passa por integrar, difundir, e arquivar grandes volumes de informação das mais diversas proveniências de forma a facilitar o rápido acesso à informação. A agência **AQUA** constitui um exemplo de aplicação de técnicas inovadoras da Área Científica da Inteligência Artificial a domínios do interesse público, neste caso à gestão e controlo dos recursos hídricos.

**Palavras-chave:** Qualidade da Água; *Data Mining*; Descoberta de Conhecimento em Bases de Dados; Sistemas MultiAgente; Raciocínio Simbólico; Qualidade da Informação

# Specification and Prototyping of Management and Control Systems of Water Quality in Reservoirs

## Abstract

New alternative approaches for modeling Water Quality Control in reservoirs emerged from the Artificial Intelligence arena.

The present work reports models for the water quality forecasting. One of them uses Symbolic Approaches and the other uses Knowledge Discovery Techniques in Databases. The Symbolic Approaches so far developed appear as the most adequate for the resolution of this type of problems because they work with any and every information that outcomes from the reservoir. This model does not depend on a process of simplification and elimination of data like the Knowledge Discovery Techniques.

Information sources in water quality control of reservoirs are distributed, heterogeneous, large and complex. The solution is to integrate, diffuse and archive this information under a dynamic framework, in order to share its knowledge with every information system that needs it. In this thesis, it is presented **AQUA** - Agency for Integration, Diffusion and Archive of Information about Water **QUALITY** in Reservoirs, which is an agency that supplies intelligent electronic workers called reactive agents, in charge of some tasks, such as communication, sending and receiving information managing and saving the information and answering to information requests. **AQUA** is, in its essence, a data warehouse to which is associated a multitude of Multi-Agent Systems. The main goals are to integrate, diffuse and archive large sets of information from different sources (laboratories, services, units, technical equipments) and to provide tools in order to implement communication with humans based on web based services. It is a promising example of the application of innovative Artificial Intelligence techniques in areas of the public domain, like the area of Water Quality Control.



**Keywords:** Water Quality; Data Mining; Knowledge Discovery from Databases; Multi-Agent Systems; Symbolic Approach; Quality-of-Information

# Conteúdo

Agradecimentos.....	<i>iii</i>
Resumo.....	<i>v</i>
Abstract.....	<i>vii</i>
Conteúdo.....	<i>ix</i>
Lista de Figuras.....	<i>xiii</i>
Lista de Tabelas.....	<i>xvii</i>
Notação.....	<i>xix</i>
1 Introdução.....	1
1.1 Caracterização do Local de Trabalho.....	2
1.1.1 Caracterização Geral da Zona Envolvente.....	4
1.1.2 Caracterização das Albufeiras Estudadas.....	5
1.1.2.1 Albufeira do Divôr.....	6
1.1.2.2 Albufeira de Monte Novo.....	9
1.1.2.3 Albufeira da Vigia.....	12
1.2 O Processo de Tomada de Decisão.....	15
1.3 A Gestão do Conhecimento.....	19
1.4 A Gestão do Conhecimento e a Inteligência Artificial.....	20
1.5 Inovação e Valor Acrescentado do Trabalho.....	21
1.6 Estrutura do Trabalho.....	24
1.7 Conclusões.....	25
2 Modelos Dinâmicos de Ecossistemas Aquáticos de Uso Genérico.....	27
2.1 Características dos Ecossistemas.....	33
2.2 Modelos de Estrutura Dinâmica.....	40
2.2.1 Aplicação a Ecossistemas Aquáticos.....	43

2.3 Modelos Baseados na Teoria do Caos .....	45
2.4 Modelos Baseados na Teoria da Catástrofe .....	46
2.5 Outras Técnicas de Modelação .....	50
2.5.1 Modelos Recorrendo à Programação Orientada ao Objecto.....	50
2.5.2 Modelos de Base Individual.....	52
2.6 Caracterização do Estado Trófico das Albufeiras Estudadas.....	53
2.7 Caracterização da Qualidade da Água das Albufeiras Estudadas .....	54
2.8 Conclusões .....	60
3 Agentes, Sistemas MultiAgente e Medida da Qualidade de Informação em Bases de Dados/Conhecimento .....	63
3.1 Agentes .....	64
3.2 Programação em Lógica Estendida.....	65
3.3 Propriedades dos Agentes.....	71
3.4 Sistemas MultiAgente .....	76
3.5 A Agência AQUA .....	78
3.6 Conclusões .....	81
4 Redes Neurais Artificiais e Descoberta de Conhecimento em Bases de Dados/Conhecimento.....	83
4.1 Fundamentos Biológicos.....	85
4.2 Perspectiva Histórica .....	88
4.3 Benefícios das Redes Neurais Artificiais.....	89
4.4 A Inteligência Artificial e as Redes Neurais Artificiais.....	90
4.5 Arquitecturas de Rede .....	90
4.6 Aprendizagem.....	92
4.7 Neurónio Artificial ou Nodo.....	94
4.8 A Arquitectura Unidireccional .....	97
4.9 Capacidades e Limitações .....	99
4.10 Descoberta de Conhecimento e Bases de Dados.....	100
4.11 Data Mining.....	101
4.11.1 Definição de Data Mining.....	102
4.11.2 Áreas Relacionadas com o Data Mining.....	104
4.11.3 Abordagens do Data Mining .....	106

---

4.11.4 Objectivos do Data Mining .....	106
4.11.4.1 Classificação .....	106
4.11.4.2 Previsão .....	107
4.11.4.3 Regressão Linear .....	108
4.11.4.4 Segmentação .....	108
4.11.4.5 Associação ou Dependência .....	109
4.11.4.6 Sumariação .....	110
4.11.4.7 Visualização .....	110
4.11.4.8 Detecção de Desvios .....	110
4.12 Descoberta de Conhecimento em Base de Dados .....	110
4.12.1 Seleção .....	111
4.12.2 Pré-Processamento .....	112
4.12.3 Transformação .....	112
4.12.4 Data Mining .....	112
4.12.5 Interpretação e Avaliação .....	113
4.13 Problemas Inerentes ao Processo de DCBD .....	113
4.14 Modelos e Técnicas Utilizadas no Processo de Data Mining .....	115
4.15 Conclusões .....	115
5 Uma Agência para a Integração, Difusão e Arquivo de Informação sobre a Qualidade da Água de Albufeiras .....	117
5.1 Resolução de Problemas em Ambiente Distribuído .....	125
5.2 O Modelo AQUA .....	126
5.3 AQUA - Modelação Simbólica .....	126
5.4 Estrutura Global do Sistema .....	128
5.5 Data Warehousing e Melhores Decisões .....	128
5.6 AQUA - Modelação Sub-Simbólica .....	140
5.7 Análise de Séries Temporais .....	141
5.8 Redes Neurais Artificiais .....	144
5.9 Generalização .....	146
5.10 Previsão da Qualidade da Água em Albufeiras Utilizando RNAs .....	150
5.11 Árvores de Decisão e Indução de Regras .....	152
5.12 A Arquitectura do Sistema AQUA .....	160
5.13 Os Agentes do Sistema AQUA .....	162

5.14 A Estrutura Lógica que Suporta a Agência AQUA.....	165
5.14.1 O Agente Monitor.....	165
5.14.2 Agentes Proxy.....	166
5.14.3 Os Agentes de Decisão .....	167
5.14.4 Os Agentes de Computação .....	167
5.14.5 Os Agentes de Recursos.....	168
5.14.6 Os Agentes de Interação e Explicação.....	169
5.14.7 O Ambiente qenv.....	170
5.15 Conclusões .....	171
6 Conclusões Finais e Perspectivas Para o Futuro.....	173
Bibliografia .....	175
Apêndice A - Conjunto de Regras Gerado a Partir dos Dados de Qualidade da Água para as Albufeiras do Divôr, Monte Novo e Vigia - Modelo 1.....	193
Apêndice B - Conjunto de Regras Gerado a Partir de um Grupo Restrito de Parâmetros de Qualidade da Água para as Albufeiras do Divôr, Monte Novo e Vigia - Modelo 2 .....	199