



**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

José Miguel Santos Araújo

**Aplicação de Redes Neuronais Artificiais  
para a criação de emuladores dos  
comportamentos hidrodinâmico e de  
qualidade de águas superficiais**



**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

José Miguel Santos Araújo

**Aplicação de Redes Neurais Artificiais  
para a criação de emuladores dos  
comportamentos hidrodinâmico e de  
qualidade de águas superficiais**

Dissertação de Mestrado  
Mestrado em Engenharia Urbana

Trabalho efectuado sob a orientação do  
**Professor Doutor José Luís da Silva Pinho**

DE ACORDO COM A LEGISLAÇÃO EM VIGOR, NÃO É PERMITIDA A  
REPRODUÇÃO DE QUALQUER PARTE DESTA TESE

Universidade do Minho, \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_

## **AGRADECIMENTOS**

A pesquisa, o desenvolvimento e a escrita fazem parte de uma viagem consumada sem sentidos. Dessa jornada desgovernada importa recordar os que nos são mais próximos e que se tornaram nos sentidos que se perderam, orientando-a a cada passo.

Ao Prof. José Luís Pinho dedico a principal homenagem. Foi ele que me incitou a iniciar esta caminhada, foi ele que me orientou, apoiou, e é graças à sua persistência que a termino. O seu conhecimento, a sua orientação e, especialmente, a sua amizade foram contributos fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Devo-lhe o gosto pela área de estudos.

Ao Prof. José Vieira pelo apoio, pelo interesse, pelos conselhos e, principalmente, pela oportunidade concedida de aprendizagem no Laboratório de Hidráulica e Recursos Hídricos (LHRH) da Universidade do Minho.

Aos meus antigos colegas do LHRH, Rui, Rita e Andrea pela sua presença. Agradeço-lhes especialmente a ajuda e o apoio que me prestaram naqueles que foram os primeiros dias desta jornada e da minha vida profissional.

Ao Camilo, à Marcês e a todos os meus colegas da MVCC – Camilo Cortesão & Associados Arquitectos, L.da, pela sua companhia.

Aos meus amigos Albina, Susana e Pedro.

Não posso deixar de agradecer aos meus pais e ao meu irmão pelo seu precioso contributo, ainda que indirecto, em todo o processo.

Por último, mas não menos importante, à minha esposa Patrícia e ao meu bebé, prestes a nascer, Diogo. Tudo o que faço na minha vida, e agora cada vez mais, faço por eles e para eles. Não poderei, por esse motivo, separar esta caminhada da sua existência.



# APLICAÇÃO DE REDES NEURONAIIS ARTIFICIAIS PARA A CRIAÇÃO DE EMULADORES DOS COMPORTAMENTOS HIDRODINÂMICO E DE QUALIDADE DE ÁGUAS SUPERFICIAIS

## RESUMO

O novo paradigma da gestão dos recursos hídricos, anunciado pela Directiva n.º 2000/60/CE (Directiva Quadro da Água - DQA) e a sua transposição para a legislação portuguesa através da Lei n.º 58 de 29 de Dezembro (Lei da Água), estabeleceu a necessidade de desenvolvimento e integração de novos mecanismos e ferramentas que possibilitem a produção de informação vital aos processos de tomada de decisão. A modelação matemática pode fornecer esse contributo à gestão dos recursos hídricos na União Europeia e, mais especificamente, em Portugal.

Para a construção de modelos hidrodinâmicos e de qualidade da água, que servirão de base aos objectivos principais do presente trabalho, foi utilizada uma ferramenta de modelação matemática em hidráulica denominada SOBEK. Este *software* específico de modelação, com uma experiência alargada de aplicação (Delft Hydraulics, 2005), permite, através de um conjunto de informação de suporte, criar reproduções da realidade hidráulica tão fiéis quanto o utilizador entender e a informação que possui permitir. Tendo identificado estes factores, a capacidade técnica do utilizador e a qualidade da informação de base, aliados à complexidade da representação da realidade na modelação matemática e à dificuldade no processamento, como sendo aqueles que mais condicionam o desempenho final dos modelos e a sua utilização, aplicou-se uma metodologia inteligente de computação, as Redes Neuronalis Artificiais (RNA), para tentar mitigar as dificuldades reconhecidas em utilizações específicas de modelação matemática como é o caso da gestão optimizada de recursos hídricos.

Estes algoritmos inteligentes, cujo desenvolvimento foi inspirado no comportamento do sistema nervoso humano, serão utilizados para interpretar e simular séries de dados de monitorização e ainda emular modelos hidrodinâmicos e de qualidade da água. Por serem algoritmos genéricos e que não implicam conhecimento específicos na área onde serão aplicados, estes modelos poderão complementar ferramentas específicas como o SOBEK e ainda reproduzir o seu comportamento matemático, desde que devidamente treinadas para o efeito.

Os resultados deste trabalho permitem compreender até que ponto as RNA poderão emular modelos hidrodinâmicos e de qualidade da água, substituindo ou complementando ferramentas específicas de modelação matemática, e ainda inferir sobre a sua capacidade de relacionar variáveis de monitorização dos recursos hídricos.

Palavras-Chave: Modelação matemática, hidrodinâmica, qualidade da água, gestão de recursos hídricos, Sobek, emulação de modelos matemáticos, hidroinformática, redes neuronais artificiais, RNA.



# **ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS APPLICATION FOR CREATING EMULATORS OF HYDRODYNAMIC AND QUALITY BEHAVIOURS OF SUPERFICIAL WATERS**

## **ABSTRACT**

The new water resources management paradigm, introduced by the Directive n.º 2000/60/CE (Water Framework Directive) and its translation to the Portuguese legislation through the Law n.º 58 of December 29 (Water law), established the need of development and integration of new mechanisms and tools that allow the generation of vital information to decision making. Mathematical modelling can provide a valuable contribution to water resources management in the European Union and, more specifically, in Portugal.

For the construction of hydrodynamic and water quality models, which will serve as support to the main objective of the present thesis, it was used the SOBEK software. This specific modelling software, already with a wide application experience (Delft Hydraulics, 2005), allows, through a set of base information, to create representations of the hydraulic reality as faithful as the user wants and the quality of the base data allows. Having identified the user technical ability and the quality of the information basis, allied to the reality representation complexity in mathematical modeling and the processing difficulty as being those which most affect the model's final performance and its use, arose the need to mitigate these known difficulties in mathematical modeling applied to water resources. For that, was applied an intelligent computation methodology, the Artificial Neural Networks (ANN).

These intelligent algorithms, which are inspired in the human nervous system behavior, will be used to interpret and simulate monitoring data series and emulate hydrodynamic and water quality models. Because they are generic algorithms that don't involve specific knowledge in the area in which they will be applied, these models may complement specific tools like SOBEK and still recreate its mathematical behavior, if properly trained for that purpose.

The results of this work allow understanding how far can the ANN go to emulate hydrodynamic and water quality models, replacing or complementing mathematical modeling specific tools, and still deduce over its ability to relate water resources monitoring variables.

Keywords: Mathematical modelling, hydrodynamics, water quality, water resources management, Sobek, mathematical models emulation, hydroinformatics, artificial neural networks, ANN.





## LISTA DE ABREVIATURAS

RNA - Redes Neurais Artificiais

DQA – Directiva Quadro da Água

LM - Levenberg-Marquardt

ETAR – Estação de Tratamento de Águas Residuais

INSAAR – Inventário Nacional de Sistemas de Abastecimento de Água e de Águas Residuais

CBO<sub>5</sub> – Carência Bioquímica de Oxigénio a cinco dias

OD – Oxigénio Dissolvido

CT – Coliformes Totais

CF – Coliformes Fecais

EF – Estreptococos Fecais

PBH – Plano de Bacia Hidrográfica

LEARNGDM - Método do Gradiente com Momento em ambiente Matlab

TANSIG – Tangente Hiperbólica em ambiente Matlab

TRAINLM – Treino por Levenberg-Marquardt em ambiente Matlab

NMP – Número mais provável

Hab – Habitantes

SNIRH – Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos

APRH – Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos



# ÍNDICE

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>2</b>
1.1 Ferramentas de modelação no contexto da DQA .....	2
1.2 Objectivos .....	4
1.3 Estrutura da dissertação .....	5
1.3.1 Modelação matemática em recursos hídricos .....	5
1.3.2 Caracterização dos modelos utilizados .....	6
1.3.3 Resultados .....	6
1.3.4 Conclusões.....	6
<b>2 MODELAÇÃO MATEMÁTICA EM RECURSOS HÍDRICOS.....</b>	<b>8</b>
2.1 Generalidades .....	8
2.2 Tipos e selecção de modelos .....	9
2.3 - Formulação matemática dos modelos utilizados .....	11
2.3.1 - Modelos hidrodinâmicos e de qualidade da água uni-dimensionais .....	11
2.4 - <i>Software</i> de modelação hidrodinâmica e de qualidade da água .....	14
2.5 - Redes neuronais artificiais .....	18
2.5.1 - Modelo Biológico .....	19
2.5.2 - Formulação matemática das RNA.....	21
2.5.3 - Estrutura de uma RNA .....	23
2.5.4 – Processo de aprendizagem nas RNA .....	25
2.6 - Aplicações das redes neuronais.....	27
2.7 – Aprendizagem com supervisão - método de Levenberg-Marquardt .....	29
2.8 – Programa Matlab – ferramenta de RNA .....	31
<b>3 CARACTERIZAÇÃO DOS MODELOS UTILIZADOS.....</b>	<b>42</b>
3.1 Modelo do rio Cávado.....	42
3.1.1 Modelo Hidrodinâmico .....	42
3.1.2 Modelo de Qualidade da água .....	48
3.2 Modelos RNA .....	57
3.2.1 Dados de monitorização da Bacia do rio Cávado.....	58
3.2.2 Parâmetros e Estrutura da RNA .....	60
3.2.3 Transformação de séries de valores .....	61

3.2.3 Modelos Desenvolvidos .....	63
<b>4 RESULTADOS .....</b>	<b>72</b>
4.1 Hidrodinâmica .....	72
4.1.1 Regressão .....	72
4.1.2 Previsão .....	82
4.1.3 Emulação .....	84
4.2 Qualidade da água .....	86
4.2.1 Regressão .....	86
4.2.2 Previsão .....	102
4.2.3 Emulação .....	105
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>118</b>
<b>6 BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>126</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>130</b>
A.1 Análise de sensibilidade dos parâmetros da RNA em Matlab .....	130
A.2 Avaliação da transformação de séries de valores .....	135

## ÍNDICE DE FIGURAS

### CAPÍTULO 2 – MODELAÇÃO MATEMÁTICA EM RECURSOS HÍDRICOS

FIGURA 2.1 - ECRÃ DE ENTRADA NO SOBEK (ARAÚJO, 2006) .....	16
FIGURA 2.2 - FERRAMENTA DE GESTÃO DE CASOS (ARAÚJO, 2006) .....	16
FIGURA 2.3 - FERRAMENTA DE GESTÃO DE CASOS DEPOIS DE ABERTO UM CASO (ARAÚJO, 2006).....	17
FIGURA 2.4 – REPRESENTAÇÃO DE UM NEURÓNIO .....	20
FIGURA 2.5 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM NODO NUMA RNA .....	22
FIGURA 2.6 – ARQUITECTURA DE REDES COM UMA SÓ CAMADA .....	24
FIGURA 2.7 – ARQUITECTURA DE REDES MULTICAMADA .....	24
FIGURA 2.8 - ARQUITECTURA DE REDES RECORRENTES .....	25
FIGURA 2.9 – JANELA PRINCIPAL DE TRABALHO DO MATLAB.....	32
FIGURA 2.10 – JANELA INICIAL DA FERRAMENTA <i>NEURAL NETWORK FITTING TOOL</i> DO MATLAB .....	33
FIGURA 2.11 – JANELA DE SELECÇÃO DE DADOS DE ENTRADA E SAÍDA PARA TREINO DA REDE .....	33
FIGURA 2.12 - JANELA DE SELECÇÃO DA PERCENTAGEM DE DADOS PARA VALIDAÇÃO E TESTE DA REDE .....	34
FIGURA 2.13 – JANELA DE CONFIGURAÇÃO DO TAMANHO DA REDE .....	35
FIGURA 2.14 – TREINO DA REDE E RESPECTIVOS RESULTADOS .....	35
FIGURA 2.15 – JANELA DE AVALIAÇÃO DA REDE.....	36
FIGURA 2.16 – EXPORTAÇÃO DE RESULTADOS .....	36
FIGURA 2.17 – JANELA PRINCIPAL DA INTERFACE AVANÇADA DA FERRAMENTA DE REDES NEURONAI	37
FIGURA 2.18 – IMPORTAÇÃO DE DADOS .....	38
FIGURA 2.19 – CRIAÇÃO DE UMA RNA.....	39
FIGURA 2.20 – OPÇÕES DE REDES NEURONAI.....	39

### CAPÍTULO 3 – CARACTERIZAÇÃO DOS MODELOS UTILIZADOS

FIGURA 3.1 – LINHAS DE ÁGUA DO MODELO GLOBAL DO RIO CÁVADO (ARAÚJO <i>ET AL.</i> , 2008B) .....	43
FIGURA 3.2 – LOCALIZAÇÃO DOS APROVEITAMENTOS HIDROELÉCTRICOS.....	45
FIGURA 3.3 – FOTOGRAFIAS DAS BARRAGENS DE APROVEITAMENTOS HIDROELÉCTRICOS NO RIO CÁVADO.....	46
FIGURA 3.4 - TRECHO DO MODELO HIDRODINÂMICO SOBEK UTILIZADO NA EMULAÇÃO .....	46
FIGURA 3.5 - SÉRIE DE VALORES MONITORIZADOS DE CAUDAL EFLUENTE MÉDIO DIÁRIO NA BARRAGEM DA CANIÇADA (JANEIRO A NOVEMBRO DE 2000).....	47
FIGURA 3.6 – FONTES TÓPICAS DE POLUIÇÃO: ETAR COM DESCARGAS CONSIDERADAS .....	50
FIGURA 3.7 – FONTES TÓPICAS DE POLUIÇÃO: INDÚSTRIAS COM DESCARGAS CONSIDERADAS .....	52
FIGURA 3.8 – FONTES TÓPICAS DE POLUIÇÃO: VACARIAS COM DESCARGAS CONSIDERADAS .....	54

FIGURA 3.9 - SÉRIES DE CAUDAL MÉDIO DIÁRIO REGISTADAS NA BACIA DO RIO CÁVADO .....	59
FIGURA 3.10 - SÉRIES DE PRECIPITAÇÃO DIÁRIA REGISTADAS NA BACIA DO RIO CÁVADO.....	60
FIGURA 3.11 – ARQUITECTURA BASE DA RNA UTILIZADA.....	63

## **CAPÍTULO 4 – RESULTADOS**

FIGURA 4.1 - SÉRIE DE VALORES MONITORIZADOS DE PRECIPITAÇÃO DIÁRIA EM BARCELOS.....	73
FIGURA 4.2 - SÉRIE DE VALORES MONITORIZADOS DE CAUDAL MÉDIO DIÁRIO EM BARCELOS .....	73
FIGURA 4.3 - COMPARAÇÃO ENTRE VALORES MONITORIZADOS E SIMULADOS (TRANSFORMADOS) PARA O CAUDAL EM BARCELOS (PRECIPITAÇÃO) .....	74
FIGURA 4.4 - SÉRIE DE VALORES MONITORIZADOS DE NÍVEL MÉDIO DIÁRIO EM BARCELOS .....	75
FIGURA 4.5 - COMPARAÇÃO ENTRE VALORES MONITORIZADOS E SIMULADOS (TRANSFORMADOS) PARA O CAUDAL EM BARCELOS (PRECIPITAÇÃO E NÍVEL).....	75
FIGURA 4.6 - COMPARAÇÃO ENTRE VALORES MONITORIZADOS E SIMULADOS (TRANSFORMADOS) PARA O CAUDAL EM BARCELOS (NÍVEL) .....	77
FIGURA 4.7 - SÉRIE DE VALORES MONITORIZADOS DE CAUDAL EFLUENTE MÉDIO DIÁRIO NA BARRAGEM DA CANIÇADA (FEVEREIRO DE 1998 A JULHO DE 1999).....	78
FIGURA 4.8 - COMPARAÇÃO ENTRE VALORES MONITORIZADOS E SIMULADOS (TRANSFORMADOS) PARA O CAUDAL EM BARCELOS (PRECIPITAÇÃO E CAUDAL EFLUENTE DA CANIÇADA) .....	79
FIGURA 4.9 - COMPARAÇÃO ENTRE VALORES MONITORIZADOS E SIMULADOS (TRANSFORMADOS) PARA A CAUDAL EM BARCELOS (CAUDAL EFLUENTE DA CANIÇADA).....	80
FIGURA 4.10 - COMPARAÇÃO ENTRE VALORES MONITORIZADOS E SIMULADOS (TRANSFORMADOS) PARA O NÍVEL EM BARCELOS (CAUDAL EFLUENTE DA CANIÇADA).....	81
FIGURA 4.11 - RESULTADOS DA PREVISÃO RNA-HP1 .....	82
FIGURA 4.12 - RESULTADOS DA PREVISÃO RNA-HP1.1 .....	82
FIGURA 4.13 - RESULTADOS DA PREVISÃO RNA-HP2 .....	83
FIGURA 4.14 - RESULTADOS DA PREVISÃO RNA-HP3 .....	83
FIGURA 4.15 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DO SOBEK E RNA (TRANSFORMADOS) PARA O CAUDAL (RNA-HE1) .....	84
FIGURA 4.16 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DO SOBEK E RNA (TRANSFORMADOS) PARA O NÍVEL (RNA-HE2) .....	84
FIGURA 4.17 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DO SOBEK E RNA (REAIS) PARA O NÍVEL (RNA-HE3) .....	85
FIGURA 4.18 - SÉRIE DE VALORES MONITORIZADOS DA CONCENTRAÇÃO DE CBO <sub>5</sub> NA BARRAGEM DA CANIÇADA E EM BARCELOS (NOVEMBRO DE 1988 A SETEMBRO DE 1999) .....	87
FIGURA 4.19 - COMPARAÇÃO ENTRE VALORES MONITORIZADOS E SIMULADOS (TRANSFORMADOS) PARA A CONCENTRAÇÃO DE CBO <sub>5</sub> EM BARCELOS (NOVEMBRO DE 1988 A SETEMBRO DE 1999).....	87
FIGURA 4.20 - SÉRIE DE VALORES MONITORIZADOS DA CONCENTRAÇÃO DE OD NA BARRAGEM DA CANIÇADA E EM BARCELOS (NOVEMBRO DE 1988 A OUTUBRO DE 1999).....	89

FIGURA 4.21 - COMPARAÇÃO ENTRE VALORES MONITORIZADOS E SIMULADOS (TRANSFORMADOS) PARA A CONCENTRAÇÃO DE OD EM BARCELOS (NOVEMBRO DE 1988 A OUTUBRO DE 1999) .....	89
FIGURA 4.22 - COMPARAÇÃO ENTRE VALORES MONITORIZADOS E SIMULADOS PARA A CONCENTRAÇÃO DE COLIFORMES TOTAIS EM BARCELOS (OUTUBRO DE 1990 A JUNHO DE 2004) .....	90
FIGURA 4.23 - COMPARAÇÃO ENTRE VALORES MONITORIZADOS E SIMULADOS PARA A CONCENTRAÇÃO DE COLIFORMES FECAIS EM BARCELOS (NOVEMBRO DE 1988 A MAIO DE 1998).....	91
FIGURA 4.24 - COMPARAÇÃO ENTRE VALORES MONITORIZADOS E SIMULADOS PARA A CONCENTRAÇÃO DE ESTREPTOCOCOS FECAIS EM BARCELOS (OUTUBRO DE 1994 A MAIO DE 1999) .....	91
FIGURA 4.25 - COMPARAÇÃO ENTRE VALORES MONITORIZADOS E SIMULADOS (TRANSFORMADOS) PARA A CONCENTRAÇÃO DE COLIFORMES TOTAIS EM BARCELOS (OUTUBRO DE 1990 A JUNHO DE 2004) .....	92
FIGURA 4.26 - COMPARAÇÃO ENTRE VALORES MONITORIZADOS E SIMULADOS (TRANSFORMADOS) PARA A CONCENTRAÇÃO DE COLIFORMES FECAIS EM BARCELOS (NOVEMBRO DE 1988 A MAIO DE 1998) .....	92
FIGURA 4.27 - COMPARAÇÃO ENTRE VALORES MONITORIZADOS E SIMULADOS (TRANSFORMADOS) PARA A CONCENTRAÇÃO DE COLIFORMES FECAIS EM BARCELOS (OUTUBRO DE 1994 A MAIO DE 1999) .....	93
FIGURA 4.28 - COMPARAÇÃO ENTRE VALORES MONITORIZADOS E SIMULADOS (TRANSFORMADOS) PARA A CONCENTRAÇÃO DE OD EM BARCELOS (NOVEMBRO DE 1988 A MAIO DE 2005).....	94
FIGURA 4.29 - SÉRIE DE VALORES MONITORIZADOS DA CONCENTRAÇÃO DE CBO <sub>5</sub> NA BARRAGEM DA CANIÇADA, EM PONTE PORTO E EM BARCELOS (MARÇO DE 1989 A JUNHO DE 2003).....	95
FIGURA 4.30 - COMPARAÇÃO ENTRE VALORES MONITORIZADOS E SIMULADOS (TRANSFORMADOS) PARA A CONCENTRAÇÃO DE CBO <sub>5</sub> EM BARCELOS (MARÇO DE 1989 A JUNHO DE 2003) .....	96
FIGURA 4.31 - SÉRIE DE VALORES MONITORIZADOS DA CONCENTRAÇÃO DE OD NA BARRAGEM DA CANIÇADA, EM PONTE PORTO E EM BARCELOS (NOVEMBRO DE 1988 A JULHO DE 2003) .....	97
FIGURA 4.32 - COMPARAÇÃO ENTRE VALORES MONITORIZADOS E SIMULADOS (TRANSFORMADOS) PARA A CONCENTRAÇÃO DE OD EM BARCELOS (NOVEMBRO DE 1988 A JULHO DE 2003) .....	98
FIGURA 4.33 - COMPARAÇÃO ENTRE VALORES MONITORIZADOS E SIMULADOS PARA A CONCENTRAÇÃO DE COLIFORMES TOTAIS EM BARCELOS (OUTUBRO DE 1990 A JUNHO DE 2005) .....	99
FIGURA 4.34 - COMPARAÇÃO ENTRE VALORES MONITORIZADOS E SIMULADOS PARA A CONCENTRAÇÃO DE COLIFORMES FECAIS EM BARCELOS (MARÇO DE 1989 A JULHO DE 2004) .....	99
FIGURA 4.35 - COMPARAÇÃO ENTRE VALORES MONITORIZADOS E SIMULADOS PARA A CONCENTRAÇÃO DE ESTREPTOCOCOS FECAIS EM BARCELOS (OUTUBRO DE 1994 A JUNHO DE 2005) .....	100
FIGURA 4.36 - COMPARAÇÃO ENTRE VALORES MONITORIZADOS E SIMULADOS (TRANSFORMADOS) PARA A CONCENTRAÇÃO DE COLIFORMES TOTAIS EM BARCELOS (OUTUBRO DE 1990 A JUNHO DE 2005) .....	101
FIGURA 4.37 - COMPARAÇÃO ENTRE VALORES MONITORIZADOS E SIMULADOS (TRANSFORMADOS) PARA A CONCENTRAÇÃO DE COLIFORMES FECAIS EM BARCELOS (MARÇO DE 1989 A JULHO DE 2004).....	101
FIGURA 4.38 - COMPARAÇÃO ENTRE VALORES MONITORIZADOS E SIMULADOS (TRANSFORMADOS) PARA A CONCENTRAÇÃO DE ESTREPTOCOCOS FECAIS EM BARCELOS (OUTUBRO DE 1994 A JUNHO DE 2005).....	102
FIGURA 4.39 - RESULTADOS DA PREVISÃO RNA-QP1.....	103



FIGURA 4.40 - RESULTADOS DA PREVISÃO RNA-QP2.....	103
FIGURA 4.41 - RESULTADOS DA PREVISÃO RNA-QP3.....	104
FIGURA 4.42 - RESULTADOS DA PREVISÃO RNA-QP4.....	104
FIGURA 4.43 - RESULTADOS DA PREVISÃO RNA-QP5.....	104
FIGURA 4.44 - RESULTADOS DA PREVISÃO RNA-QP6.....	104
FIGURA 4.45 - RESULTADOS DA PREVISÃO RNA-QP7.....	104
FIGURA 4.46 - RESULTADOS DA PREVISÃO RNA-QP8.....	104
FIGURA 4.47 - RESULTADOS DA PREVISÃO RNA-QP9.....	104
FIGURA 4.48 - RESULTADOS DA PREVISÃO RNA-QP10.....	104
FIGURA 4.49 - RESULTADOS DA PREVISÃO RNA-QP11.....	104
FIGURA 4.50 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DO SOBEK E RNA (TRANSFORMADOS) PARA CBO <sub>5</sub> (CENÁRIO 1).....	106
FIGURA 4.51 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DO SOBEK E RNA (TRANSFORMADOS) PARA CBO <sub>5</sub> (CENÁRIO 2).....	106
FIGURA 4.52 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DO SOBEK E RNA (TRANSFORMADOS) PARA OD (CENÁRIO 1).....	108
FIGURA 4.53 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DO SOBEK E RNA (TRANSFORMADOS) PARA OD (CENÁRIO 2).....	109
FIGURA 4.54 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DO SOBEK E RNA (TRANSFORMADOS) PARA COLIFORMES TOTAIS (CENÁRIO 1).....	110
FIGURA 4.55 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DO SOBEK E RNA (TRANSFORMADOS) PARA COLIFORMES TOTAIS (CENÁRIO 2).....	111
FIGURA 4.56 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DO SOBEK E RNA (TRANSFORMADOS) PARA COLIFORMES FECAIS (CENÁRIO 1).....	111
FIGURA 4.57 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DO SOBEK E RNA (TRANSFORMADOS) PARA COLIFORMES FECAIS (CENÁRIO 2).....	112
FIGURA 4.58 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DO SOBEK E RNA (TRANSFORMADOS) PARA ESTREPTOCOCOS FECAIS (CENÁRIO 1).....	112
FIGURA 4.59 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DO SOBEK E RNA (TRANSFORMADOS) PARA ESTREPTOCOCOS FECAIS (CENÁRIO 2).....	113
FIGURA 4.60 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DO SOBEK E RNA (TRANSFORMADOS) PARA OD (CENÁRIO 1).....	114
FIGURA 4.61 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DO SOBEK E RNA (TRANSFORMADOS) PARA OD (CENÁRIO 2).....	114
FIGURA 4.62 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DO SOBEK E RNA (TRANSFORMADOS) PARA CBO <sub>5</sub> (CENÁRIO 1).....	115
FIGURA 4.63 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DO SOBEK E RNA (TRANSFORMADOS) PARA CBO <sub>5</sub> (CENÁRIO 2).....	115

## **ANEXOS**

FIGURA A.1 - SÉRIES DE CAUDAL REGISTRADO E RESULTANTES DAS RNA.....	132
FIGURA A.2 - SÉRIES DE CAUDAL REGISTRADO E RESULTANTES DAS RNA.....	133
FIGURA A.3 - GRÁFICO COMPARATIVO DE SIMULAÇÕES COM TRANSFORMAÇÃO DE DADOS.....	136



## ÍNDICE DE QUADROS

### CAPÍTULO 2 – MODELAÇÃO MATEMÁTICA EM RECURSOS HÍDRICOS

QUADRO 2.1 – FUNÇÕES DE ACTIVAÇÃO.....	23
--	----

### CAPÍTULO 3 – CARACTERIZAÇÃO DOS MODELOS UTILIZADOS

QUADRO 3.1 – EXTENSÃO DO RIO E NÚMERO DE ESTRUTURAS CONSIDERADAS NO MODELO HIDRODINÂMICO E DE QUALIDADE DA ÁGUA .....	43
QUADRO 3.2 – CONDIÇÕES DE FRONTEIRA E VARIÁVEIS DO MODELO HIDRODINÂMICO SOBEK.....	47
QUADRO 3.3 – COEFICIENTES ESPECÍFICOS DE EMISSÃO PARA AS ACTIVIDADES INDUSTRIAIS.....	51
QUADRO 3.4 – NÚMERO DE EFECTIVOS NAS VACARIAS CONSIDERADAS .....	53
QUADRO 3.5 – CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA NAS FRONTEIRAS DO MODELO SOBEK .....	56
QUADRO 3.6 – CARACTERÍSTICAS DAS FONTES TÓPICAS CONSIDERADAS NO MODELO DE QUALIDADE DA ÁGUA (CENÁRIO 1) .....	56
QUADRO 3.7 – CARACTERÍSTICAS DAS FONTES TÓPICAS CONSIDERADAS NO MODELO DE QUALIDADE DA ÁGUA (CENÁRIO 2) .....	57
QUADRO 3.8 - ESTAÇÕES HIDROMÉTRICAS E METEOROLÓGICAS DA BACIA DO RIO CÁVADO .....	58
QUADRO 3.9 – RESUMO DOS MODELOS DE REGRESSÃO .....	64
QUADRO 3.10 – RESUMO DOS MODELOS DE PREVISÃO .....	66
QUADRO 3.11 – RESUMO DOS MODELOS EMULADORES.....	67

### CAPÍTULO 4 – RESULTADOS

QUADRO 4.1 – RESUMO COMPARATIVO DOS COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO NAS FASES DE TREINO E PREVISÃO.....	82
QUADRO 4.2 – COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO RESULTANTES DAS REDES EMULADORAS HIDRODINÂMICAS .....	85
QUADRO 4.3 – RESUMO COMPARATIVO DOS COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO NAS FASES DE TREINO E PREVISÃO.....	103
QUADRO 4.4 – COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO RESULTANTES DAS REDES EMULADORAS DE QUALIDADE DA ÁGUA PARA CBO <sub>5</sub> .....	106
QUADRO 4.5 – COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO RESULTANTES DAS REDES EMULADORAS DE QUALIDADE DA ÁGUA PARA OD.....	108
QUADRO 4.6 – COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO RESULTANTES DAS REDES EMULADORAS DE QUALIDADE DA ÁGUA PARA COLIFORMES TOTAIS, FECAIS E ESTREPTOCOCOS FECAIS.....	110
QUADRO 4.7 – COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO RESULTANTES DAS REDES EMULADORAS DE QUALIDADE DA ÁGUA PARA CBO <sub>5</sub> E OD.....	114

## **ANEXOS**

QUADRO A.1 – RESUMO DO NÚMERO DE NEURÓNIOS UTILIZADOS .....	130
QUADRO A.2 – RESUMO DOS ERROS (COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO).....	131
QUADRO A.3 – RESUMO DOS ERROS (COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO).....	133
QUADRO A.4 – RESUMO DOS PARÂMETROS DISPONÍVEIS SIMULADOS .....	134
QUADRO A.5 – RESUMO DOS PARÂMETROS DISPONÍVEIS SIMULADOS .....	135

CAPÍTULO

**1**

## **INTRODUÇÃO**

*Alguns Homens vêm as coisas como são e perguntam:  
Porquê? Eu sonho com coisas que nunca foram e  
pergunto: Porque não?*

Shaw, George Bernard

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 FERRAMENTAS DE MODELAÇÃO NO CONTEXTO DA DQA

A Directiva n.º 2000/60/CE (DQA) e a sua consequente transposição para a legislação portuguesa, através da Lei n.º 58 de 29 de Dezembro (Lei da Água), veio alterar a forma como os recursos hídricos, superficiais ou subterrâneos, são encarados em termos da sua utilização sustentável e, sobretudo, veio alterar a forma como estes recursos devem ser geridos. Nos tempos que antecederam a entrada em vigor desta legislação, a água, enquanto recurso, era um bem à disposição das necessidades públicas e privadas sem que lhe fosse garantida a devida protecção. A sua degradação a ritmos inoportáveis devido ao desenvolvimento da humanidade e da indústria, não em termos exclusivos de quantidade mas sobretudo em termos da sua qualidade para consumo, motivou o crescimento de vozes inconformadas com as projecções negativas sobre a evolução do recurso no futuro. Sendo este um bem indispensável ao desenvolvimento da vida, foi crescendo uma consciência comum sobre a necessidade da sua protecção para que, não só no futuro, mas também no presente, fosse preservada a qualidade deste bem, reconhecendo-o como fonte de vida.

O aproveitamento sustentável da água determinou a criação de um novo paradigma da gestão deste recurso. O modelo agora introduzido altera radicalmente a forma como o recurso é considerado espacialmente, ou seja, as fronteiras existentes entre os estados membros na União Europeia deverão deixar de constituir entraves à gestão dos recursos hídricos, existindo mesmo a obrigação de adaptar os sistemas existentes, mais ou menos desenvolvidos, a esta exigência e integração do recurso no meio em que se insere. É ainda considerado, não um bem isolado, mas como um elemento essencial de um ecossistema complexo. Esta visão mais abrangente é um dos factores mais importantes na nova legislação porque, não só permite uma protecção integrada da água, mas também a utiliza como meio de ligação entre todos os estados membros. Outra característica que importa acrescentar é a alteração do modelo de utilização da água, no qual todas as utilizações deverão ser analisadas, geridas e monitorizadas sempre com o objectivo principal de proteger a qualidade do recurso, penalizando quem mais o utiliza e/ou o degrada (APRH, 2007).

---

É no âmbito destas alterações de comportamento que o desenvolvimento e integração de mecanismos de gestão de recursos hídricos mais fazem sentido porque possibilitam a produção de informação de apoio à decisão. A modelação matemática aplicada à resolução de problemas hidráulicos pode fornecer esse contributo à gestão dos recursos hídricos na União Europeia e, mais especificamente, em Portugal. Estes modelos específicos tentam reproduzir, através de modelação matemática, os fenómenos associados ao escoamento de água e à sua qualidade. Trata-se de informação essencial que, quando associada a outro tipo de dados e organizada em sistemas de informação geográfica, permite uma tomada de decisões mais sustentada. Possibilitam, ainda, a construção de possíveis cenários adequados ao comportamento dos recursos hídricos a estudar, os quais poderão antecipar acontecimentos futuros ou até mesmo fornecer ao seu utilizador possíveis soluções baseadas nesses mesmos cenários.

Uma das várias ferramentas disponíveis para modelação matemática em hidráulica, e que será alvo de utilização no presente trabalho, é o programa SOBEK (Delft Hydraulics, 2005). Esta aplicação, constituída por diversos módulos como a hidrologia, a hidrodinâmica (em canais e rios), redes de águas residuais, controlo em tempo real, qualidade da água e previsão de áreas inundáveis, permite a construção de modelos adequados aos fenómenos a representar e, nos casos em que seja possível, a interacção entre os diferentes módulos, tais como a hidrologia-hidrodinâmica ou hidrodinâmica-qualidade da água, etc.. Como em qualquer ferramenta com aplicação semelhante, a interpretação e adequação da realidade aos algoritmos do programa são indispensáveis para que a sua reprodução seja o mais representativa possível. Uma das grandes dificuldades destas operações não será tanto a identificação e interpretação desses fenómenos, tarefa facilitada a indivíduos com conhecimentos na área, mas a procura por informação e dados de base que permitam quantificar esses fenómenos e possibilitem a sua representação em equações matemáticas, ou interfaces gráficas de *software*, desenvolvidas para o efeito (Araújo *et al.*, 2007a). Poder-se-á identificar diversas dificuldades nesta tarefa, tais como: o levantamento do número e características de estruturas em linhas de águas superficiais, as secções transversais do canal e a sua topografia, em problemas de quantidade de água, e a



composição química ou microbiológica de uma água superficial ou de fontes poluidoras tóxicas ou difusas e a sua identificação, em problemas de qualidade da água. Também os algoritmos, resultantes de vários anos de desenvolvimento por parte das empresas de *software*, são preponderantes para o sucesso do desenvolvimento de modelos aplicáveis a situações reais, exigindo formação específica na área, não só para quem desenvolve os modelos mas também para quem os utiliza. Esta necessidade de formação específica na área torna a tarefa de modelação matemática de recursos hídricos difícil, o que aliado à pouca informação de base usualmente disponível, dificulta a implementação deste tipo de ferramentas em empresas, públicas ou privadas, com necessidades específicas de informação associadas à gestão dos recursos hídricos.

## 1.2 OBJECTIVOS

Este trabalho tem como principal objectivo a aplicação de novas tecnologias como as Redes Neurais Artificiais (RNA) no contexto da modelação matemática de forma a que os resultados obtidos possam ser utilizados no desenvolvimento de ferramentas de apoio à gestão de recursos hídricos. As RNA, tal como o próprio nome indica, pretendem reproduzir o funcionamento do sistema nervoso humano, tentando incorporar a sua capacidade de adquirir conhecimento. Esse conhecimento resulta de um processo de aprendizagem, através de algoritmos desenvolvidos para o efeito, que relaciona os dados fornecidos de entrada e saída através de pesos atribuídos às ligações entre neurónios artificiais. Ainda que se possa identificar as RNA como sendo modelos matemáticos, o seu funcionamento e aplicação são mais generalizados, sendo cada rede construída e treinada de acordo com a informação que lhe é fornecida. Esta característica permite um infindável número de aplicações possíveis, ao contrário das ferramentas de modelação baseadas em equações físicas, químicas e biológicas, cuja base matemática é aplicada exclusivamente aos fenómenos que se pretendem traduzir. Estes algoritmos inteligentes tentam, entre outros propósitos, mitigar as dificuldades na utilização de *software* específico de modelação, neste caso aplicados a recursos hídricos, dispensando utilizadores com formação específica na área, não na parte de construção, treino e desenvolvimento da rede, mas na fase de aplicação e utilização final do produto onde, muitas vezes, os decisores não possuem essa

formação e necessitam de ferramentas rápidas e com um nível de fiabilidade compatível com a sua função. Por outro lado, estas ferramentas apresentam uma rapidez de cálculo muito elevada o que permite a sua utilização integrada com ferramentas de optimização cada vez mais utilizadas na resolução de problemas relacionados com a gestão de recursos hídricos.

Este funcionamento genérico e aplicado a virtualmente qualquer problema poderá reduzir a precisão na representação da realidade. Pretende-se com este trabalho, ao emular modelos matemáticos aplicados a recursos hídricos, avaliar a relação de compromisso entre essa generalização e facilidade de utilização e o desempenho da RNA relativamente ao modelo emulado.

### 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Na presente dissertação e após este capítulo de introdução aos seus conteúdos, dividiu-se a sua estrutura pelos capítulos apresentados de seguida.

#### 1.3.1 Modelação matemática em recursos hídricos

Neste capítulo é feita uma exposição sucinta sobre a modelação matemática em águas superficiais fluviais, sobre os modelos normalmente aplicados e a sua relação com os recursos hídricos. São apresentadas as equações matemáticas em que se baseiam os modelos hidrodinâmico e de qualidade da água, bem como o *software* que será utilizado para a sua construção.

Faz-se também neste capítulo uma descrição sobre as Redes Neurais Artificiais e a sua analogia ao modelo biológico do sistema nervoso humano. Serão ainda abordadas e diferenciadas as características associadas às diferentes RNA e a sua influência na selecção de redes em função dos objectivos pretendidos. Tal como nos modelos hidrodinâmico e de qualidade da água, é apresentado o *software* de RNA utilizado.

### 1.3.2 Caracterização dos modelos utilizados

Neste capítulo faz-se a apresentação detalhada dos modelos hidrodinâmico e de qualidade da água e do modelo de RNA.

É apresentada a informação de base utilizada na construção dos modelos hidrodinâmicos e de qualidade de água. Encontra-se ainda implícita a adequação destes dados às exigências e necessidades do *software* seleccionado.

No modelos RNA definem-se os parâmetros base, os quais serviram todos os modelos construídos, e ainda metodologias para definição de alguns dos critérios necessários à sua construção.

### 1.3.3 Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados dos modelos desenvolvidos, incluindo os resultados das RNA criadas, utilizando os dados de monitorização, previamente seleccionados, e os resultados do modelo SOBEM. Estes resultados serviram de base a três tipos de RNA distintos, sendo o seu desempenho avaliado de acordo com os critérios definidos.

### 1.3.4 Conclusões

Neste capítulo apresentam-se as principais conclusões obtidas com este trabalho, especialmente sobre a aplicabilidade de RNA à gestão dos recursos hídricos.

**CAPÍTULO**

# **2** **MODELAÇÃO MATEMÁTICA EM RECURSOS HÍDRICOS**

*Actividade enriquece mais do que a prudência.*

Vauvenargues, Luc de Clapiers

## 2 MODELAÇÃO MATEMÁTICA EM RECURSOS HÍDRICOS

### 2.1 GENERALIDADES

A modelação matemática pode ser considerada como uma forma de descrever fenómenos intrínsecos à realidade na qual estamos inseridos. Este processo visa a aproximação ou correlação desses fenómenos a sistemas tangíveis e resultantes da ciência, desenvolvendo a percepção e o conhecimento do meio que nos rodeia.

A formulação destes problemas reais é auxiliada pela precisão da linguagem matemática, o que ajuda à formulação de ideias e à identificação de pressupostos que, muitas vezes, se encontram subjacentes ao problema. A forma clara e concisa desta linguagem científica associada a regras de manipulação bem definidas poderão permitir um elevado grau de confiança nos resultados.

Embora a matemática seja um instrumento preciso, não se pode afirmar que a modelação matemática também o seja. Grande parte do peso da afirmação anterior pode ser atribuído à variável humana e, mais especificamente, à visão que cada ser humano possui da realidade que o envolve. Necessariamente, esta condicionante poderá produzir soluções diferentes e com graus de aproximação diferentes, mas igualmente válidas. A variabilidade de modelos e respectivos resultados pode também ser explicada pela grande complexidade dos processos naturais que fazem parte da nossa realidade e que, por essa razão, obrigam a assumir compromissos nas diferentes fases de construção de um modelo. Poder-se-ão destacar alguns desses compromissos: a identificação e selecção inicial das variáveis com maior importância no fenómeno a descrever, a quantidade de dados a manipular, as equações utilizadas e a forma de as resolver.

A corrente de formulação matemática de processos naturais tem vindo a crescer, não só pelo contínuo desenvolvimento da linguagem, métodos de resolução e aumento das capacidades de computação, mas também pelo aparecimento incessante de novos objectivos, desafios e áreas onde a sua aplicabilidade se tem revelado de grande utilidade. Um desses exemplos é a previsão dos processos envolvidos no ciclo

hidrológico que, devido à sua elevada complexidade, conduziu ao desenvolvimento de diferentes ferramentas para a modelação dos recursos hídricos.

Tal como referido anteriormente, para criação, aplicação e utilização de modelos hidrodinâmicos e de qualidade de água é indispensável um conhecimento aprofundado dos processos modelados, das formulações matemáticas em que são baseados os programas utilizados e das técnicas numéricas associadas à obtenção de resultados.

## 2.2 TIPOS E SELECÇÃO DE MODELOS

Para qualquer formulação ou resolução de um problema é necessário, antes de mais, o seu conhecimento profundo. A categorização dos possíveis modelos a aplicar é igualmente importante pois permitirá retirar algumas informações úteis acerca do problema. Uma das categorias existentes classifica os modelos de acordo com o resultado que determinam (Quintela e Portela, 2002). Os modelos **determinísticos** ignoram a variação aleatória dos dados e, por isso, produzem resultados iguais para os mesmos dados iniciais. Os modelos **estocásticos**, são modelos estatísticos por natureza e que poderão determinar uma distribuição de resultados possíveis.

Outra forma de distinguir os modelos matemáticos é baseada no seu nível de descrição dos processos naturais que tentam representar. Podem ser distinguidos entre modelos **empíricos** ou **mecanicistas**. Os primeiros resultam essencialmente da manipulação de dados, obtidos através de medições directas ou indirectas, e por aplicação de métodos estatísticos com graus de complexidade variáveis. Os segundos baseiam-se no conhecimento e modelação dos processos físicos, químicos e biológicos associados aos processos.

A selecção de um modelo de simulação de um determinado processo passa pela verificação da adequação da formulação matemática em que se baseia aos objectivos que se pretendem atingir com as simulações a realizar. A formulação deverá incluir todos os aspectos físicos, químicos e biológicos determinantes do comportamento do sistema hídrico. Naturalmente que poderão ser sempre aplicados os modelos mais

complexos que englobem o maior número de processos possíveis. No entanto, o custo da sua implementação e utilização pode tornar-se demasiado elevado e comprometer a possibilidade de realizar simulações de uma forma simples e integrada numa ferramenta de suporte à decisão. Este aspecto deve estar sempre presente nas fases de selecção e criação dos modelos procurando-se obter soluções que resultem de um compromisso entre a real possibilidade da sua aplicação prática e a necessidade de simular de modo adequado os processos hidrológicos e de qualidade da água.

O desempenho de um determinado modelo hidrológico, hidrodinâmico ou de qualidade da água depende essencialmente da qualidade da informação disponível para a sua criação. Para todos os tipos de modelos mencionados a informação geométrica disponível para a representação dos domínios envolvidos revela-se crucial para uma adequada simulação dos processos a modelar. No caso dos modelos hidrológicos, é necessário dispor-se de modelos digitais de terreno para a totalidade das sub-bacias hidrológicas; levantamentos batimétricos (perfis longitudinais e transversais) das principais linhas de água e canais no caso dos modelos hidrodinâmicos, e batimetrias actualizadas das albufeiras para os modelos de balanço hídrico e qualidade da água destes meios hídricos (Araújo et al., 2008a).

Para além da informação geométrica dos domínios a modelar é necessária informação meteorológica e hidrométrica. Esta informação é necessária em três fases distintas: estabelecimento de acções nos modelos (ex. precipitação e evapotranspiração potencial nos modelos hidrológicos, caudais nos modelos hidrodinâmicos e intensidade da luz nos modelos de qualidade da água.); definição de valores das variáveis a modelar nas fronteiras dos modelos (ex. níveis da água, ou caudais em modelos hidrodinâmicos); e finalmente, na fase de calibração e validação para comparar valores medidos no protótipo com resultados de modelos.

Para o desenvolvimento de modelos de qualidade da água é necessário um conjunto de informação relativa a parâmetros físico-químicos e biológicos de maior ou menor extensão de acordo com os processos que se pretendem simular. Estas séries são

utilizadas na definição das condições de fronteira dos modelos e nas tarefas de calibração e validação.

No presente capítulo são caracterizadas, numa abordagem sintética, as formulações matemáticas em que se baseiam cada um dos modelos determinísticos criados no âmbito deste trabalho depois de apresentados os objectivos de modelação para cada um dos sistemas modelados. Desta forma, ficam definidos, genericamente, os principais processos físicos, químicos e biológicos modelados, as simplificações e hipóteses de base consideradas, estabelecendo-se, assim, as potencialidades de simulação de cada um dos modelos implementados.

### 2.3 - FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DOS MODELOS UTILIZADOS

Tendo sido determinada a estrutura do modelo a utilizar, será necessário seleccionar o conjunto de equações matemáticas representativas, tanto quanto possível, dos processos a simular.

Os sistemas modelados neste trabalho referem-se aos diferentes meios hídricos superficiais, naturais ou artificiais, onde, através da modelação matemática, se pretende caracterizar os fluxos de água e o transporte de substâncias ou propriedades que são utilizadas como indicadores de estado da qualidade das massas de água. A caracterização dos fluxos de água denomina-se de hidrodinâmica, quando se trata de canais (naturais ou artificiais) ou de albufeiras.

De seguida, apresenta-se a formulação matemática em que se baseiam os modelos criados, com os quais se procura simular os processos característicos que neles ocorrem, considerando as adequadas escalas espaciais e temporais.

#### 2.3.1 - Modelos hidrodinâmicos e de qualidade da água uni-dimensionais

O escoamento em linhas de água foi modelado recorrendo-se a modelos baseados em formulações unidimensionais do escoamentos com superfície livre.



A modelação do escoamento unidimensional é baseada nas equações de continuidade e de conservação da quantidade de movimento. Estas equações apresentam a seguinte forma:

$$\frac{\partial A_f}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_{lat} \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A_f} \right) + g A_f \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{g Q |Q|}{C^2 R A_f} - W_f \frac{\tau_{wi}}{\rho_w} = 0 \quad (2)$$

em que,

$Q$ , é o caudal [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$t$ , é o tempo [s]

$x$ , a coordenada unidimensional [m]

$A_f$ , é a área da secção molhada [ $\text{m}^2$ ]

$g$ , é a aceleração da gravidade [ $\text{m}/\text{s}^2$ ]

$h$ , é a altura do escoamento [m]

$C$ , é o coeficiente de Chézy [ $\text{m}^{1/2}/\text{s}$ ]

$R$ , é o raio hidráulico [m]

$W_f$ , é a largura superficial [m]

$q_{lat}$ , é o caudal lateral unitário [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

$\tau_{wi}$ , tensão tangencial devida ao vento [ $\text{N}/\text{m}^2$ ]

$\rho_w$ , massa volúmica da água [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

Para além das equações anteriores são ainda utilizadas na construção de modelos unidimensionais, expressões adequadas ao cálculo das características de escoamento em estruturas como: pontes, passagens hidráulicas, sifões invertidos, orifícios, bombas, sifões e descarregadores. Nestas estruturas o escoamento depende dos níveis a montante e a jusante da estrutura, das suas dimensões e de um conjunto de parâmetros específicos de cada uma delas.

Os diferentes processos biogeoquímicos com interesse para o estudo de problemas de qualidade da água apresentam uma diversidade muito grande, tendo-se optado por definir um conjunto, o mais abrangente possível, que engloba quer processos simples (como por exemplo a modelação de descargas acidentais de poluentes conservativos), quer processos de maior complexidade, como é o caso dos modelos de produção primária.

Nos processos envolvendo substâncias conservativas considera-se apenas o transporte de uma determinada substância no meio hídrico através de advecção e dispersão.

As descargas acidentais de poluentes em meios aquáticos são uma realidade cada vez mais frequente. A avaliação das extensões e durações destas descargas poderá ser efectuada recorrendo-se a um modelo em que a descarga acidental é modelada por uma substância conservativa. A simulação do transporte das substâncias definidas é feita através da resolução numérica da equação advecção-dispersão.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} (u_x C) \quad (3)$$

em que,

$C$ , é a concentração da substância [mg/L];

$u_x$ , é a componente da velocidade segundo o eixo dos  $xx$  [m/s];

$D_x$ , é a componente da dispersão segundo o eixo dos  $xx$  [m<sup>2</sup>/s].

Para além das situações de descargas acidentais, estes modelos simples têm também interesse prático para a quantificação dos tempos de residência e para a análise do efeito de diferentes condições hidrodinâmicas nas condições de mistura.

A generalidade dos elementos e substâncias nos meios aquáticos apresentam reacções com outros elementos e/ou substâncias, resultando na sua transformação (diminuição ou aumento de concentração). Estes processos designam-se por processos de substâncias não conservativas. A contaminação bacteriana resultante de descargas de

águas residuais domésticas ou de origem difusa, por exemplo, poderá ser modelada adoptando-se um decaimento de 1ª ordem. O comportamento de muitas outras substâncias (ou espécies) pode ser razoavelmente aproximado através da consideração de decaimentos ou crescimentos de 1ª ordem, tais como: carência bioquímica de oxigénio (CBO), algas, etc. Os coeficientes das leis de 1ª ordem deverão ser estabelecidos preferencialmente a partir dos dados de campo disponíveis ou de análises laboratoriais. Para fazer reflectir matematicamente este comportamento, o processo pode ser descrito pela Eq. 4 com a introdução do correspondente termo de reacção (crescimento/decaimento).

No caso de uma lei de variação de 1ª ordem tem-se:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} (u_x C) + F(C, t) \quad (4)$$

em que,

$C$ , é a concentração da substância [mg/L];

$t$ , é o tempo [s]

$u_x$ , é a componente da velocidade segundo o eixo dos  $xx$  [m/s];

$D_x$ , é a componente da dispersão segundo o eixo dos  $xx$  [m<sup>2</sup>/s];

## 2.4 - SOFTWARE DE MODELAÇÃO HIDRODINÂMICA E DE QUALIDADE DA ÁGUA

No âmbito deste trabalho e com o objectivo de produzir as bases de modelos a emular foi seleccionado, após uma avaliação de algumas alternativas de modelação hidrodinâmica e de qualidade de água, o programa Sobek (Delft Hydraulics, 2005) para a modelação dos referidos problemas, o qual utiliza formulações matemáticas do tipo anteriormente apresentado.

O *software* SOBEK é aplicável a problemas de modelação hidrodinâmica e qualidade da água em rios, sendo constituído por sete módulos: hidrologia, hidrodinâmica em canais, hidrodinâmica em rios, redes de águas residuais, controlo em tempo real,

qualidade da água e previsão de áreas inundáveis. O seu desenvolvimento integrado permite a simulação de problemas envolvendo diferentes módulos em simultâneo. É baseado num método numérico bastante robusto que permite a obtenção de soluções mesmo para as simulações mais complexas.

A modelação do escoamento unidimensional é baseada nas equações de continuidade e de conservação da quantidade de movimento (Eq. 1 e Eq. 2). Para além das equações anteriores são ainda utilizadas expressões adequadas ao cálculo das características de escoamento em estruturas como: pontes, passagens hidráulicas, sifões invertidos, orifícios, bombas, sifões e descarregadores. Nestas estruturas, tal como já referido, o escoamento depende dos níveis a montante e a jusante do elemento, das suas dimensões e de um conjunto de parâmetros específicos de cada uma delas.

Os modelos de qualidade da água são baseados na resolução unidimensional da equação de transporte (Eq. 4), permitindo a simulação de distintos processos biogeoquímicos relacionados com a qualidade da água. O programa usa um método numérico conhecido como esquema de Delft baseado num algoritmo denominado de grau mínimo com solução iterativa.

Os dados são armazenados em ficheiros de texto e os resultados em ficheiros binários que podem ser exportados para um ficheiro com formato compatível com formatos utilizados em base de dados.

A utilização desta aplicação é muito intuitiva, bastando apenas ao utilizador ser conhecedor de algumas das regras de funcionamento para que a possa utilizar e, mesmo que não tenha esses conhecimentos, a interface ajudá-lo-á.

Quando se inicia o programa, o utilizador depara-se com a imagem apresentada na Figura 2.1. Aqui é possível criar um novo projecto, abrir ou apagar um projecto existente, analisar casos dentro de um projecto ou tomar algumas notas que o modelador ache relevantes

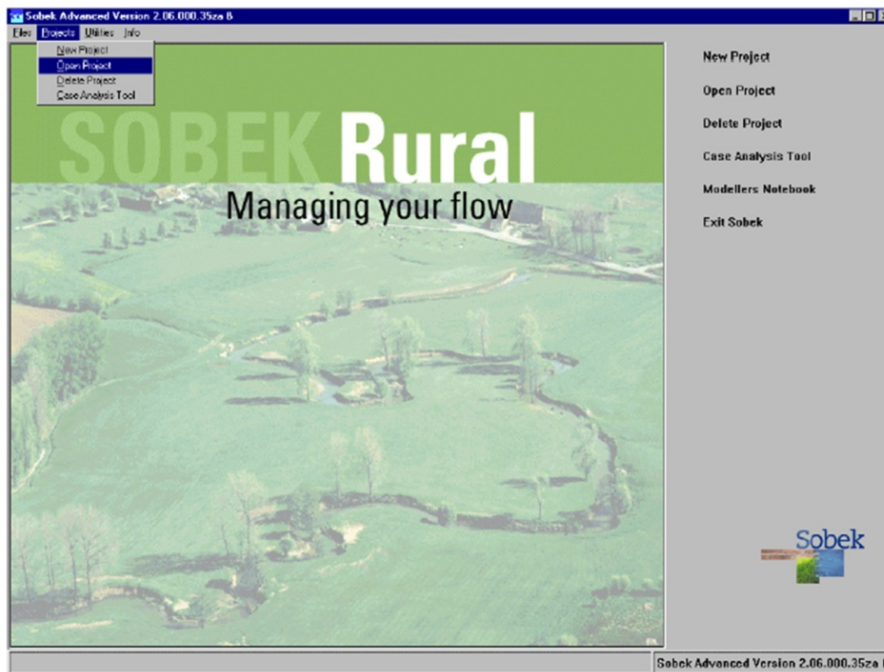


Figura 2.1 - Ecrã de entrada no SOBEK (adaptado de Araújo, 2006)

Após o início de um novo projecto ou da abertura de um projecto previamente gravado, é apresentada ao utilizador a interface da Ferramenta de Gestão de casos (Figura 2.2).

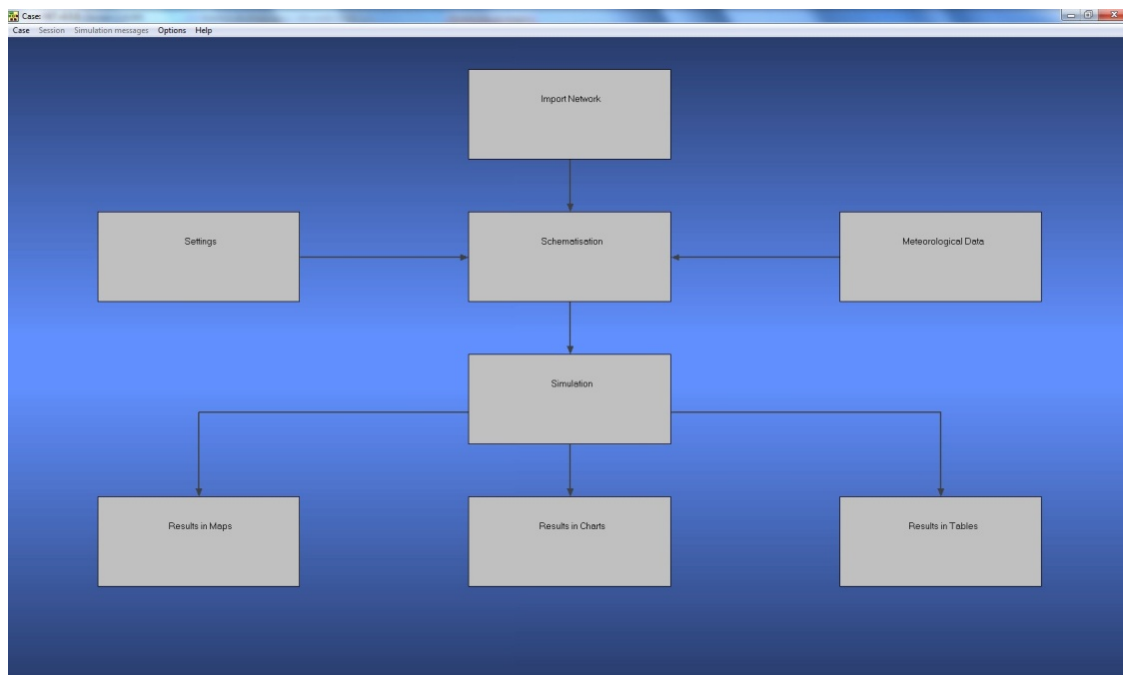


Figura 2.2 - Ferramenta de gestão de casos (adaptado de Araújo, 2006)

A ferramenta de gestão de casos permite, tal como o próprio nome indica, a organização dos diferentes casos de estudo existentes em cada projecto. Os casos referem-se muitas vezes a diferentes variações de condições de fronteira, condições iniciais, tempo de simulação ou precipitação. Este tipo de estrutura permite, assim, criar várias alternativas dentro do mesmo projecto.

Cada bloco na ferramenta de gestão de casos representa uma tarefa na modelação. Os sentidos das ligações entre os blocos indicam quais as tarefas que deverão ser executadas em primeiro lugar e as que serão executadas subsequentemente. Nesta ferramenta é possível abrir, criar, copiar ou apagar diversos casos no mesmo projecto. Para tal basta aceder ao menu *Case* localizado na zona superior esquerda do ecrã.

Após a abertura ou criação de um caso os blocos de tarefas irão mudar de aspecto (Figura 2.3).

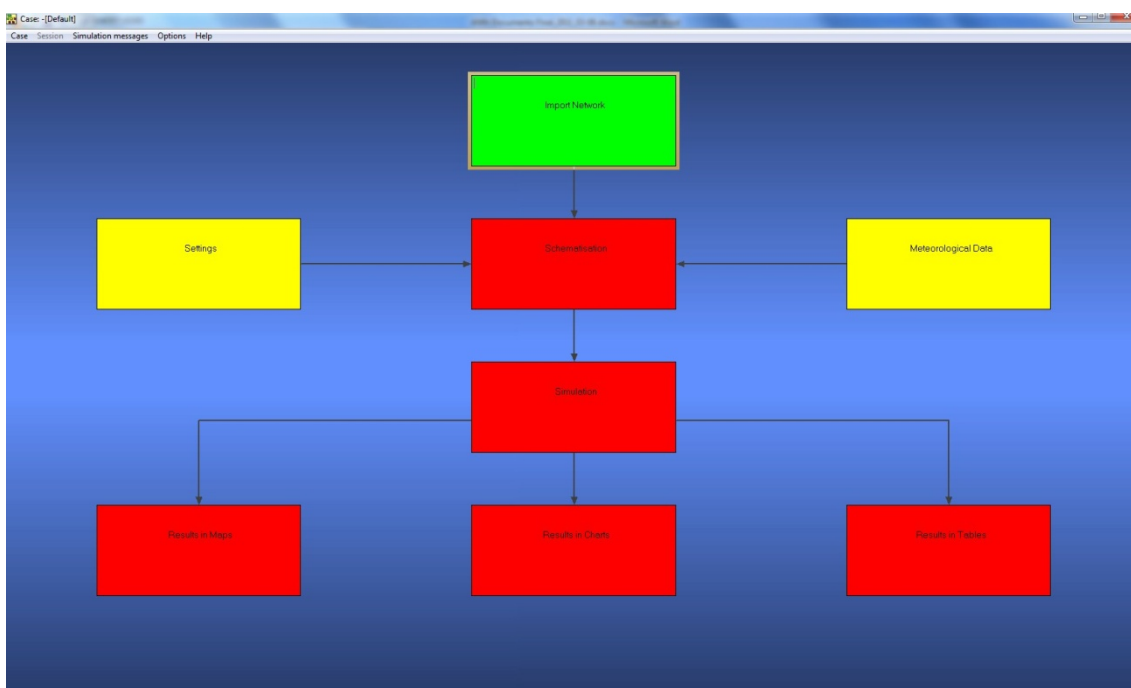


Figura 2.3 - Ferramenta de gestão de casos depois de aberto um caso (adaptado de Araújo, 2006)

Como é possível deduzir da comparação entre as figuras 2.2 e 2.3, os blocos deixaram a sua cor cinzenta e ficaram amarelos, vermelhos e, um deles, verde. Quando os blocos

estão cinzentos significa que nenhum caso foi seleccionado ou definido. O amarelo autoriza a execução da tarefa enquanto que o vermelho proíbe a sua execução uma vez que necessita de execução prévia das tarefas precedentes (amarelas). Enquanto uma tarefa é executada o bloco aparecerá em roxo e quando a mesma estiver concluída a cor será verde.

O bloco *Import network* permite a importação de um modelo de um outro programa que seja compatível com o SOBEK. Em *Settings* é possível seleccionar o tipo de modelo desejado a partir das opções disponíveis e já referidas bem como as condições de simulação do próprio modelo. Para introduzir dados meteorológicos como o vento ou chuva utiliza-se o *Meteorological Data*. O *Schematization* é das tarefas mais importantes a ser executada pois permite a inserção ou edição do modelo e dos dados das diferentes estruturas que o compõem. Tal como o próprio nome indica, *Simulation* irá fazer a simulação do modelo com os dados introduzidos. Os restantes blocos, *Results in maps*, *Results in charts* e *Results in tables*, mostram os resultados das simulações.

## 2.5 - REDES NEURONAIAS ARTIFICIAIS

A simulação através de RNA é baseada na imitação do funcionamento do sistema nervoso central do ser humano. As RNA são estruturas interligadas de unidades computacionais, frequentemente designadas por neurónios ou nodos, com capacidade de aprendizagem (Cortez e Neves, 2000). O conhecimento, à semelhança do cérebro humano, é adquirido através de um processo de aprendizagem ou treino que é caracterizado pela utilização de um conjunto de dados de entrada e saída. A relação entre estes dados é determinada pelo algoritmo e armazenada nas ligações, sob a forma de pesos, entre os neurónios pertencentes à rede. Após o processo de aprendizagem e consequente determinação dos pesos entre os neurónios, será possível a introdução de novos dados de entrada com vista à obtenção dos resultados pretendidos.

Embora se reconheça que a arquitectura das RNA esteja muito longe de traduzir o comportamento da mente humana e, mais especificamente, o seu sistema nervoso,

são inegáveis as suas capacidades enquanto forma de modelação matemática. Sobre as formas de modelação existentes até ao momento e em comparação com outras formas de inteligência artificial, a eficiência das RNA resulta de estruturas com funcionamento paralelo. Ao contrário das redes de inteligência artificial que processavam informação de forma sequencial, o paralelismo das RNA possibilita uma maior flexibilidade e rapidez de execução.

A sua capacidade de aprendizagem, através de informação que lhe é previamente fornecida, permite a adaptação dos seus parâmetros internos às respectivas solicitações e até mesmo à sua interpretação. Uma rede treinada poderá generalizar ou extrapolar o conhecimento e deduzirá uma resposta, mais ou menos adequada consoante a quantidade e qualidade do treino, em função dos dados de entrada.

A não linearidade conferida pela concepção das ligações entre nós da rede, possibilita um comportamento mais aproximando da realidade, onde grande parte dos problemas são não lineares.

Trata-se de um modelo matemático flexível, capaz de ser aplicado a inúmeros problemas dos mais variados domínios. A sua robustez permite incorporar, sem comprometer o resultado, o ruído resultante de informação incompleta ou inconsistente, ainda que com reflexos no resultado.

### 2.5.1 - Modelo Biológico

O momento que, possivelmente, terá feito emergir as RNA foi quando McCulloch e Pitts (1943) publicaram um artigo com o título, com tradução directa para português, “O cálculo lógico das ideias inerentes à actividade nervosa”. Neste artigo, tentam compreender como é que o cérebro consegue produzir padrões extremamente complexos com a utilização de células básicas que se encontram ligadas entre si. Apesar destas células básicas, denominadas de neurónios, produzirem sistemas complexos, estes autores conseguiram construir um sistema simplificado do seu funcionamento que, de alguma forma, facilita o seu conhecimento e, conseqüentemente, a sua incorporação em estudos para além das ciências humanas.



Embora este tenha sido o grande passo que despoletou toda a evolução do conhecimento do cérebro humano e as suas aplicações na computação, muito há ainda para descobrir e desenvolver.

Do que se conhece nos dias de hoje, o neurónio apresenta quatro regiões principais na sua estrutura (Figura 2.4). O corpo da célula, que apresenta duas ramificações, as Dendrites e o Axónio, cujas extremidades são as Sinapses que garantem a recepção e transmissão, respectivamente, entre células.

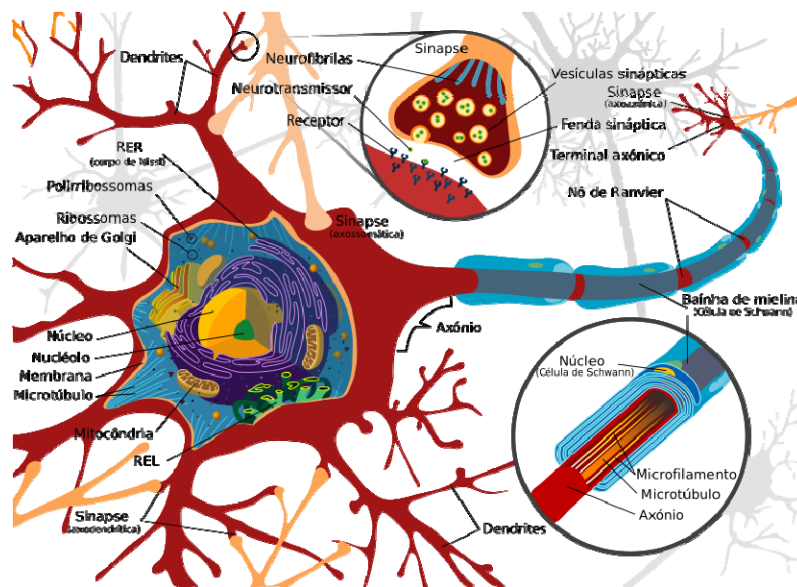


Figura 2.4 – Representação de um neurónio

O corpo da célula é o seu coração e contém o núcleo, garantindo a síntese de proteína. Esta região é responsável pelo processamento de informação recebida e produção da resposta subsequente. O Axónio possui ramificações, pelas quais a informação produzida é transmitida desde o corpo da célula à Dendrite de outro neurónio.

Tal como já foi referido, a Sinapse é a área de contacto entre dois neurónios, os quais não se encontram fisicamente em contacto, sendo a comunicação feita através de impulso de origem eléctrica e química. O sinal gerado pelo neurónio e transportado através do Axónio é um impulso eléctrico. Por outro lado o sinal entre as Sinapses de um Axónio e uma Dendrite são de origem química e é transportado por moléculas denominadas de neurotransmissores.

A comunicação é, resumidamente, feita através de alterações das concentrações dos iões  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ , aos quais a membrana da célula é permeável. Esta agirá de forma a manter a diferença de potencial (potencial de repouso) entre o líquido no interior e exterior da célula. Estas geram impulsos que expandem localmente nas proximidades das Dendrites. Dependendo da intensidade do estímulo, o impulso poderá atingir o corpo da célula, repetindo o processo de interpretação e comunicação entre as regiões dos neurónios e entre neurónios.

### 2.5.2 - Formulação matemática das RNA

Tal como já referido, um neurónio artificial, ou nodo, tem um comportamento semelhante ao seu “homólogo” biológico, ou seja, é simples, único e integra o processo de recepção de informação de nodos vizinhos e cálculo do resultado para o destino correspondente que, em muitos casos, poderão ser diversos nodos.

Na construção de qualquer RNA é possível identificar, dependendo da sua localização na rede, três tipos de neurónios computacionais ou nodos: entrada, saída e ocultos. Os nodos de entrada, como o próprio nome indica, representam os dados que “alimentam” a rede e que podem ter origens variadas como sensores, registos históricos, resultados de outra rede, etc. Os de saída representam o resultado da operação da rede em função dos dados de entrada fornecidos ou também poderão ser considerados, dependendo do caso, do objecto de treino de uma determinada rede. Por último, os nodos pertencentes à área oculta da rede, fazem o relacionamento dos dados de entrada com os de saída.

A Figura 2.5 é uma representação de um dos modelos mais utilizados para definir o funcionamento de um nodo numa RNA.

O funcionamento do neurónio e axónio é modelado por uma função integração (ou função básica) e uma função de activação. A selecção destas funções depende do tipo de aplicação dado à rede neuronal.

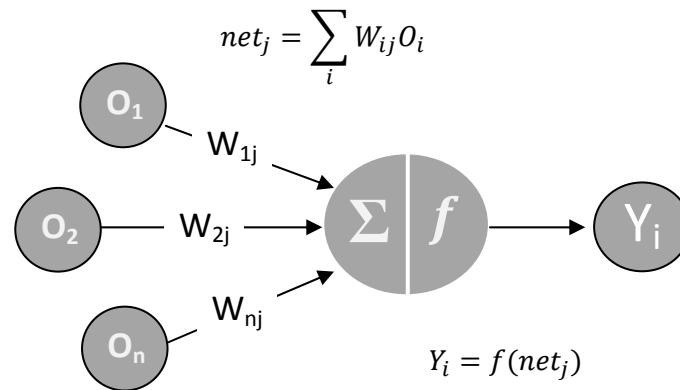


Figura 2.5 – Representação esquemática de um nodo numa RNA

A forma mais comum de integração, função que reduz os N argumentos de entrada num único valor, é uma combinação linear dos dados ou resultados de nodos anteriores, e pode ser representada da seguinte forma:

$$net_j = \sum_i W_{ij} O_i \quad (5)$$

O termo  $W_{ij}$  representa as conexões entre nodos sendo atribuído a cada uma dessas conexões um *peso*, o qual representa a intensidade da ligação entre os nodos  $i$  e  $j$ . Este *peso* é atribuído e manipulado durante o treino da rede, devido ao qual se poderá considerar que o conhecimento reside neste factor. A função de activação aplicada a  $net_j$  condiciona o valor de saída da rede, fornecendo-lhe uma componente de não linearidade. Normalmente são aplicadas nesta transformação funções limite, tangente hiperbólica, logística, de acordo com o Quadro 2.1, abaixo apresentado.

É ainda importante acrescentar que os nodos de entrada são os únicos que não apresentam o comportamento anteriormente indicado porque apenas servem para transmitir informação à camada seguinte, não tendo qualquer função de cálculo.

Quadro 2.1 – Funções de activação

Nome	Função $f$	Contradomínio
Limiar	$\begin{cases} 1, u_i \geq 0 \\ 0, u_i < 0 \end{cases}$	$[0,1]$
Linear	$u_i$	$]-\infty, +\infty[$
Por troços	$\begin{cases} 1, u_i \geq 0,5 \\ ku_i, -0,5 < u_i < 0,5 \\ 0, u_i \leq -0,5 \end{cases}$	$[0,1]$
Logística	$\frac{1}{1 + e^{-ku_i}}$	$[0,1]$
Tangente hiperbólica	$\tanh(ku_i)$	$[-1,1]$
Seno	$\sin(u_i \bmod 2\pi)$	$[-1,1]$
Co-seno	$\cos(u_i \bmod 2\pi)$	$[-1,1]$
Gaussiana	$e^{\left(\frac{-u_i^2}{2k^2}\right)}$	$[-1,1]$
Quadrada	$-sign(u_i)u_i^2$	$]-\infty, +\infty[$

### 2.5.3 - Estrutura de uma RNA

A estrutura de uma RNA não é mais do que a definição da forma como os nodos se encontram organizados na rede e, especificamente, o modo como interagem.

A distribuição dos nodos numa rede neuronal é feita através de diferentes camadas ou níveis, existindo, dentro de cada uma, um número definido de nodos. Numa rede neuronal existem, pelo menos, três camadas distintas: a de entrada, a de saída e a oculta. Ao contrário das camadas de entrada e saída, a rede poderá não conter camadas de neurónios ocultas ou, em alternativa, possuir uma ou mais camadas deste tipo.

A rede poderá também ser definida pelos padrões das ligações. Uma rede será totalmente interligada quando todos os sinais de saída de uma determinada camada chegam a todos os nodos individualmente da camada seguinte. Se alguma destas ligações não existir, então a rede será apenas parcialmente interligada.

O fluxo de informação entre as diferentes camadas de uma rede neuronal artificial condiciona a forma como é definida a rede. Nas redes *Feedforward* o fluxo de informação é exclusivamente unidireccional e poderá apresentar uma só camada ou várias (multicamada). Numa só camada, Figura 2.6, apenas são consideradas as camadas de entrada e de saída. A camada de entrada não é definida como tal porque, como já referido, não realiza qualquer cálculo.

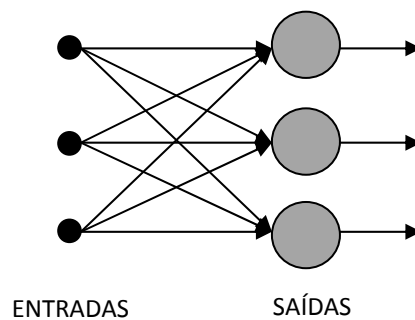


Figura 2.6 – Arquitectura de redes com uma só camada

Nas redes multicamada (Figura 2.7), existem uma ou mais camadas intermédias que contêm os nodos ocultos. Ao incrementar o número destas camadas, aumenta-se também a capacidade de modelação de funções mais complexas. Esta acção trará, como seria expectável, um aumento considerável do tempo de aprendizagem e cálculo da rede.

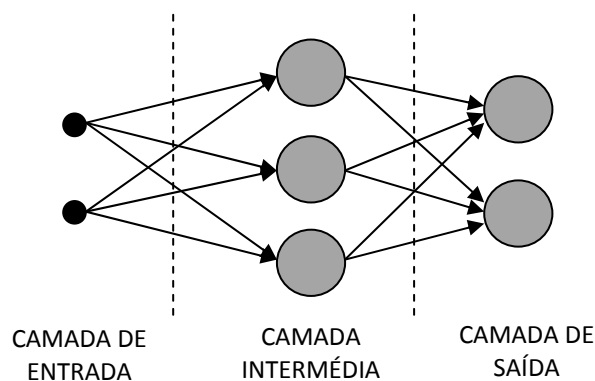


Figura 2.7 – Arquitectura de redes multicamada

Na caracterização de redes por fluxo, é ainda possível classificá-las como Recorrentes (Figura 2.8). Neste tipo de redes o sinal de saída de um nodo poderá influenciar o sinal

de entrada nesse mesmo nodo. Esta introdução de conexões cíclicas inculca à rede um comportamento não linear e que poderá ser utilizado para a modelação de funções cognitivas, tais como a de memória associativa e/ou temporal. A última iteração do ciclo, que será terminado quando o critério de paragem associado for cumprido, será o sinal de saída para o nodo.

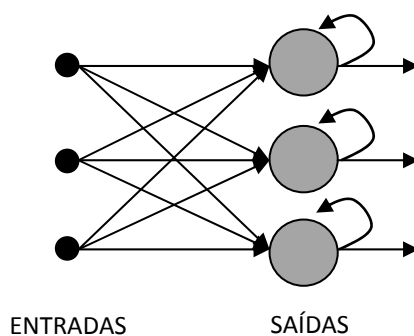


Figura 2.8 - Arquitectura de redes recorrentes

#### 2.5.4 – Processo de aprendizagem nas RNA

O processo de aprendizagem, embora não totalmente definido, poderá ser deduzido da informação apresentada até ao momento. Resumidamente, poder-se-á considerar que a aprendizagem de uma RNA resulta da adaptação dos pesos das ligações em função da relação dos dados de entrada, ou do ambiente que envolve a rede, com os dados de saída. A RNA responderá de forma diferente ao ambiente em função das alterações na sua estrutura interna.

O processo de aprendizagem é executado de acordo com um conjunto de regras denominado de algoritmo de aprendizagem ou treino. Outra condição importante na aprendizagem de uma rede é a forma como o ambiente serve de exemplo ao modelo, ou seja, o paradigma da RNA. Os diversos algoritmos existentes baseiam-se em premissas distintas para cada uma das condições anteriores, cada um deles oferecendo vantagens distintas.

Apresentam-se, de seguida, os paradigmas da aprendizagem nas RNA.

- **Aprendizagem com supervisão**

Neste paradigma, é fornecido ao modelo um vector de respostas para o respectivo vector de dados de entrada, pretendendo-se que a RNA ajuste os pesos das conexões em função destes dados conhecidos, entrada e saída.

Neste processo, sendo conhecidos os resultados, a rede irá atribuir um peso às conexões para que, com a introdução do vector de dados de entrada, os resultados se aproximem daqueles que são previamente conhecidos e introduzidos na rede. Este é um processo iterativo sendo, em cada ciclo, gerado um erro que será tanto menor quanto a aproximação dos resultados da rede aos resultados conhecidos. Quando o valor do erro atingir um valor igual ou inferior ao definido na rede, o processo iterativo cessa e resultará uma rede treinada em função dos dados fornecidos. Para este paradigma existem alguns algoritmos de aprendizagem (Moreira, 1997) e que são apresentados, resumidamente, de seguida:

- Regra de Widrow-Hoff (ou método do gradiente aplicado em redes neurais lineares);
- Regra de retropropagação do erro (error backpropagation), trata-se de uma generalização da regra anterior a redes lineares ou não lineares e com três ou mais camadas;
- Gradiente, para a qual existem técnicas que permitem melhorar a sua convergência, tais como a técnica do momento e da taxa adaptativa de aprendizagem;
- Método de Levenberg-Marquardt aplicável a redes não lineares;
- Técnicas heurísticas;

Importa acrescentar que as redes não lineares com camadas escondidas e de alimentação directa podem ser conhecidas por redes de retropropagação e de alimentação directa.

- **Aprendizagem sem supervisão**

Como o próprio nome indica, neste paradigma não é fornecida à rede qualquer informação sobre a eficácia e/ou eficiência da mesma. A sua aprendizagem é feita de acordo com os possíveis padrões de relacionamento existentes entre os dados de entrada. É essencialmente aplicada em sistemas de memória associativa e de reconhecimento de padrões. Podem ser utilizados diversos algoritmos, dos quais se destacam:

- Algoritmos de estimulação pela entrada ou algoritmos de aprendizagem associativa;
- Algoritmos de aprendizagem competitiva.

- **Aprendizagem de reforço**

Este paradigma apresenta um funcionamento situado entre os dois apresentados anteriormente. Isto significa que, tal como nos algoritmos sem supervisão, também no paradigma de reforço não é apresentado o resultado à rede para o respectivo treino. No entanto, é fornecida uma indicação sobre se a resposta que a rede produz à solicitação está ou não correcta. Com estas indicações a rede vai desenvolvendo a tarefa de aprendizagem até atingir um resultado satisfatório.

## 2.6 - APLICAÇÕES DAS REDES NEURONAIAS

Do ponto de vista prático e aplicacional das RNA é possível deduzir que as suas grandes virtudes residem essencialmente na gestão de processos não lineares, adaptativos e paralelos. O conhecimento das suas possíveis aplicações, as quais se apresentam de seguida, revestem-se de especial importância não só porque demonstram a utilidade desta ferramenta, mas também porque permitem uma selecção de arquitecturas e



método de aprendizagem mais adequados aos objectivos propostos. Destacam-se as categorias seguintes:

- Reconhecimento de padrões: ou classificação supervisionada, é utilizado quando é fornecido ao sistema uma entrada representada por um vector, sendo esta classificada de acordo com a estrutura de classes predefinida.
- Diagnóstico: ou classificação não supervisionada devido à inexistência, em antítese ao reconhecimento de padrões, de estruturas predefinidas de classes. Neste tipo de aplicação a rede irá agrupar os dados brutos de entrada de acordo com as suas possíveis semelhanças.
- Regressão/Previsão: O objectivo dos problemas de regressão é modelar um conjunto de dados através da aproximação a uma função conhecida. A previsão, caso particular da regressão, não é mais do que uma tentativa de antecipar valores futuros de acordo com os dados históricos da mesma função.
- Optimização: Este é um tipo de situação mais prática e mais adequada a problemas matemáticos, científicos ou de engenharia e cuja principal finalidade é minimizar ou maximizar uma função objectivo de acordo com as respectivas restrições.
- Memória associativa: Há dois tipos de formulações relativas a esta aplicação: a autoassociação e a heteroassociação. No primeiro, após aprendizagem dos dados submetidos à rede, este é capaz de reconstruir o padrão original da rede se lhe forem fornecidos apenas dados parciais da mesma. O segundo difere do primeiro na forma como o padrão é reconhecido, ou seja, durante o treino a rede organiza a informação em pares entrada/saída e, sempre que for fornecido um valor de entrada, ela devolve um de saída. Aquele é um problema não supervisionado enquanto que este é supervisionado.
- Controlo: Este tipo de problemas está associado ao controlo de sistemas de acordo variáveis fornecidas ao sistema, seja por via manual ou automática. A

rede processa esses dados e fornece uma resposta ao sistema de acordo com os dados de entrada e com o respectivo treino que lhe foi administrado.

## 2.7 – APRENDIZAGEM COM SUPERVISÃO - MÉTODO DE LEVENBERG-MARQUARDT

No presente trabalho e tal como será demonstrado mais à frente, a aplicação Matlab, utilizada na construção e simulação de RNA, faz uso do método de Levenberg-Marquardt para cálculo das redes introduzidas, motivando o seu desenvolvimento teórico no presente capítulo.

O algoritmo de Levenberg-Marquardt (LM) é uma técnica iterativa que fornece uma solução numérica para o problema de minimização de uma função, geralmente não linear (Gavin, 2010). Esta técnica é essencialmente aplicada em problemas de mínimos quadrados, os quais têm como principal objectivo o ajuste de um conjunto de dados a uma função de forma a que o quadrado das diferenças entre o valor real e o ajustado seja o mínimo possível.

Este método é considerado como uma combinação entre os métodos do Gradiente e Gauss-Newton, utilizando os reconhecidos benefícios de cada um. Quando a solução inicial se revela distante dos mínimos quadrados da função, o algoritmo comporta-se como o método do Gradiente, lento mas com mais garantias de convergência. Por outro lado, quando as condições iniciais são mais aproximadas, o algoritmo aproxima-se do método de Gauss-Newton.

Considerando a seguinte função não-linear:

$$F_{(Y)} = X \quad (6)$$

Onde  $X \in \mathbb{R}^M$  e  $Y \in \mathbb{R}^N$  são vectores em que  $M \geq N$ . Frequentemente é necessário estimar um vector  $\hat{Y}$  com condições iniciais e que melhor se ajuste ao vector medido  $\hat{X}$ , para facilitar a convergência do modelo. O problema das condições iniciais do modelo poderá ser formulado nos seguintes moldes:

Dado o vector  $\hat{X}$ , que inclui os valores medidos, é necessário determinar  $\hat{Y}$ , de tal forma que o erro  $\|\varepsilon\|$  seja minimizado. Esta relação é traduzida pela seguinte equação:

$$\hat{X} = F_{(\hat{Y})} + \varepsilon \quad (7)$$

Através do método de Newton, o vector  $\hat{Y}$  que contém as condições iniciais é refinado, sendo-lhe atribuído o seguinte formato:

$$F_{(\hat{Y}+\Delta)} = F_{(\hat{Y})} + \mathbb{J}\Delta \quad (8)$$

Em que:

$\mathbb{J}$  é a matriz Jacobiana, ou seja,

$$\mathbb{J} = \frac{\partial X}{\partial Y} \quad (9)$$

$\Delta$  é o incremento a  $\hat{Y}$ , implementado pelo algoritmo.

Assim, minimizar  $\|\varepsilon\|$  equivale a minimizar  $\|\varepsilon - \mathbb{J}\Delta\|$ , que não é mais do que a resolução da equação (10):

$$\mathbb{J}^T \mathbb{J} \Delta = \mathbb{J}^T \varepsilon \quad (10)$$

Para acelerar a convergência do método de resolução de Gauss-Newton, Levenberg propôs uma alteração à equação anterior (10) e da qual resulta:

$$(\mathbb{J}^T \mathbb{J} + I\lambda) \Delta = \mathbb{J}^T \varepsilon \quad (11)$$

Em que:

$I$  é a matriz identidade;

$\lambda$  toma, inicialmente, o valor de  $10^{-4}$  sendo alterado em cada iteração de acordo com o erro produzido. Se o erro diminuir,  $\lambda$  é dividido por 10, enquanto que, se o erro aumentar, é multiplicado por 10.

Após a aplicação deste método introduzido por Levenberg, foi verificada alguma instabilidade do modelo quando  $\lambda$  cresce. Para melhorar a convergência do método reduzindo a instabilidade causada pelo algoritmo de Levenberg, Marquardt propôs uma alteração no gradiente e, mais especificamente, na forma como este é calculado durante as iterações para convergência do algoritmo. O gradiente será, então, ponderado em cada iteração de acordo com a curvatura da equação, aumentando assim a possibilidade de convergência. Para isso Marquardt substitui a matriz identidade pela diagonal da matriz  $\mathbb{J}^T \mathbb{J}$ , resultando a equação:

$$[\mathbb{J}^T \mathbb{J} + \text{diag}(\mathbb{J}^T \mathbb{J})\lambda]\Delta = \mathbb{J}^T \varepsilon \quad (12)$$

## 2.8 – PROGRAMA MATLAB – FERRAMENTA DE RNA

O Matlab, cujo nome provém das iniciais de MATrix LABoratory, é um sistema interactivo para a computação numérica e gráfica. Este *software* integra ferramentas de análise numérica, cálculo de matrizes, processamento de sinais, construção de gráficos, visualização e programação num ambiente expresso de acordo com a linguagem matemática (Demuth *et al.*, 2010).

Nos dias de hoje, este programa é amplamente utilizado por todo o mundo e constitui mesmo uma ferramenta de auxílio ao ensino. Esta difusão e crescimento motivaram o contínuo desenvolvimento da aplicação, incorporando a experiência dos seus utilizadores e os seus contributos. Esta política justificou a criação de um gestor de extensões (*Add-on*) que permite integrar no programa diversas ferramentas que sirvam as necessidades do utilizador sem que este necessite de adquirir novas versões do mesmo. A sua interface (Figura 2.9) é simples de utilizar e é composta, essencialmente, pelas janelas de Comandos, Histórico de Comandos, Pasta de Trabalho Actual e a Área de Trabalho.

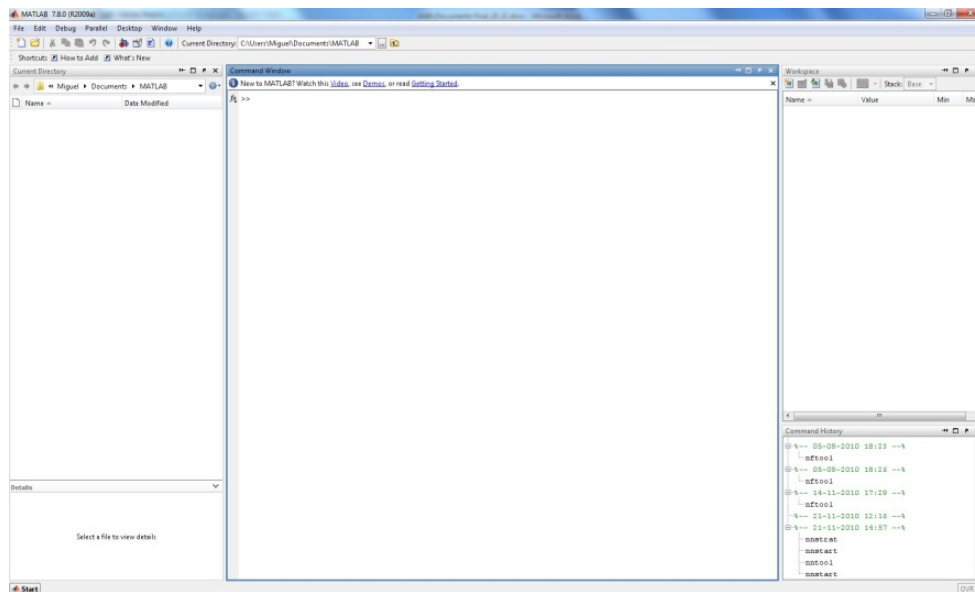


Figura 2.9 – Janela principal de trabalho do Matlab

Neste trabalho e de acordo com os objectivos propostos, será utilizada a ferramenta de Redes Neurais do Matlab, cujo funcionamento se enquadra nos princípios das RNA já apresentados anteriormente. Esta ferramenta permite, através de um conjunto de quatro interfaces gráficas, resolver problemas de regressão, reconhecimento de padrões, agrupamento de informação e análise de séries temporais. Para utilização de problemas mais comuns de regressão, os quais serão abordados em capítulos posteriores do presente trabalho, é possível utilizar a ferramenta *Neural Network Fitting Tool* (Figura 2.10), introduzindo o comando *nftool* na respectiva janela.

Para utilização desta ferramenta é necessário, em primeiro lugar, definir o tipo de problema a resolver que será, neste caso, um problema de regressão de séries de dados lineares ou não lineares. Para isso, terá de ser fornecido ao programa os vectores de entrada e saída para que este possa proceder à regressão e, mais especificamente, ao treino da rede (Figura 2.11).

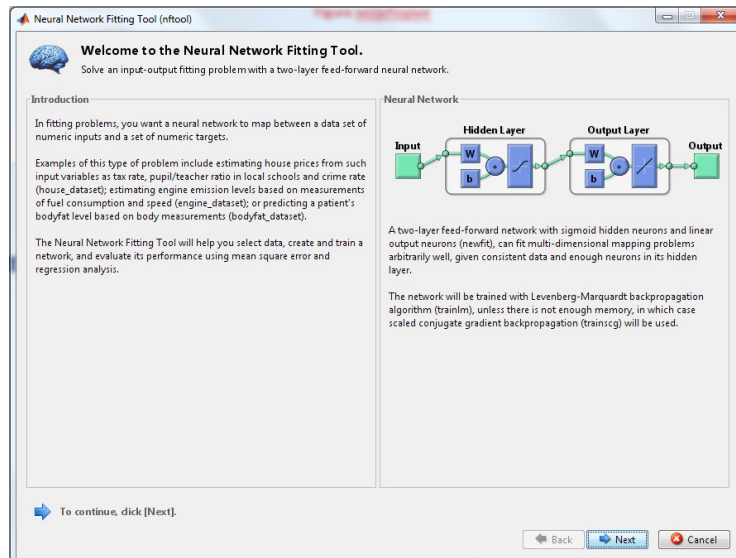


Figura 2.10 – Janela inicial da ferramenta *Neural Network Fitting Tool* do Matlab

Esses vectores deverão estar definidos na *Área de Trabalho* como variáveis do ambiente Matlab.

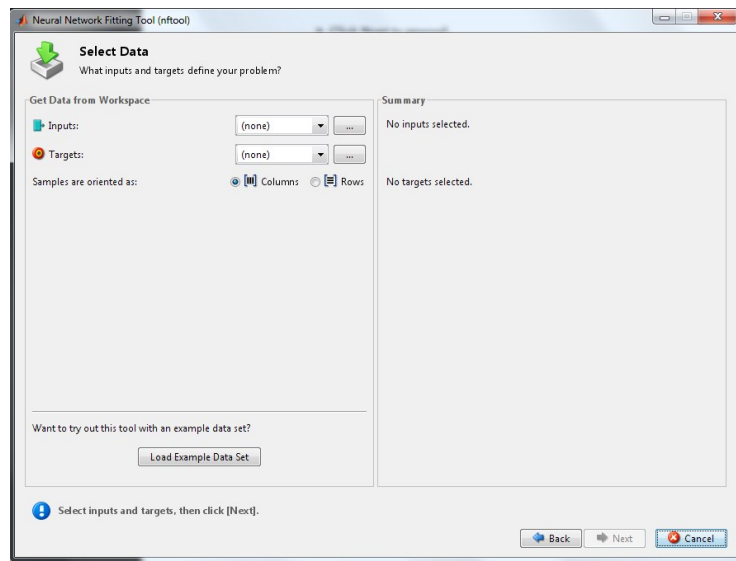


Figura 2.11 – Janela de selecção de dados de entrada e saída para treino da rede

Seleccionadas as séries de dados, o programa dividirá a informação em três séries distintas; Treino, Validação e Teste (Figura 2.12). O Treino utilizará 70% da informação total fornecida à ferramenta e representa a parte mais importante da regressão porque será nesta fase do processo que os pesos serão ajustados de acordo com o erro

produzido. A Validação e Teste partilharão os restantes 30% do total da série de dados. A Validação avalia a eficiência da rede treinada e é utilizada para parar o treino quando esta deixa de melhorar, enquanto que o Teste não tem qualquer influência no treino e é utilizado exclusivamente para avaliar o desempenho desta após o treino.

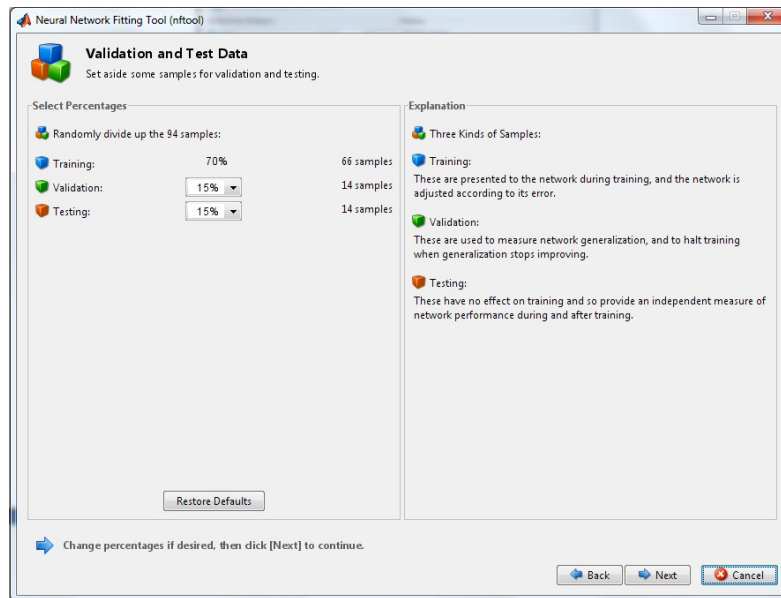


Figura 2.12 - Janela de selecção da percentagem de dados para Validação e Teste da rede

A Rede a treinar terá a configuração apresentada na Figura 2.13, sendo necessário definir, aqui, o número de neurónios desta. Este ponto é muito importante para o desempenho da rede e deverá ser avaliado com todo o cuidado. Um número de neurónios desajustado à série de dados poderá implicar um mau desempenho da rede sendo que, se for introduzido um número insuficiente a rede terá uma aproximação reduzida aos dados e, por outro lado, se o número de neurónios for elevado poderá conduzir a resultados que, embora possam apresentar coeficientes de correlação mais elevados, se encontram fora do domínio de valores.

O treino da rede será iniciado na janela apresentada na Figura 2.14. O desempenho da rede poderá ser avaliado, nas três fases do processo, através dos valores do erro médio quadrático e do coeficiente de correlação.

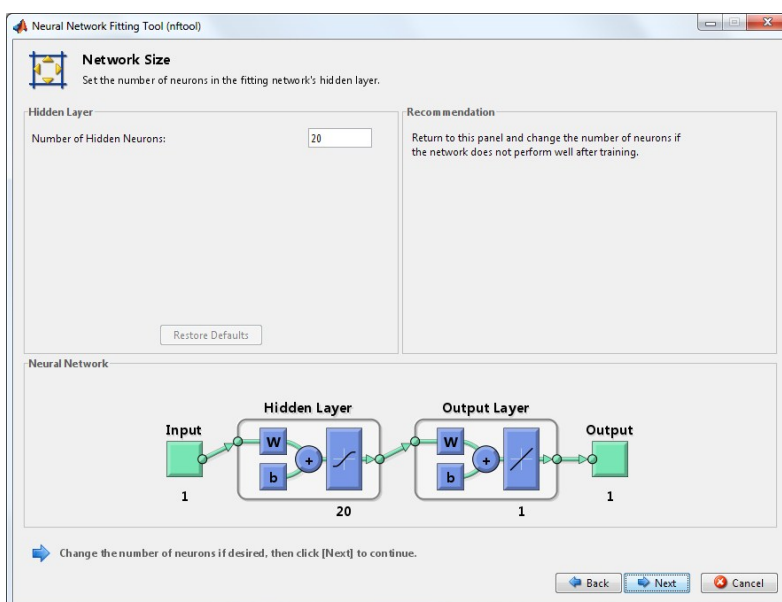


Figura 2.13 – Janela de configuração do tamanho da rede

Se estes indicadores não se revelarem satisfatórios, poderá ser iniciado novo processo de treino tendo como base inicial os pesos do treino anterior. Este processo nem sempre garantirá um resultado melhor do que o precedente.

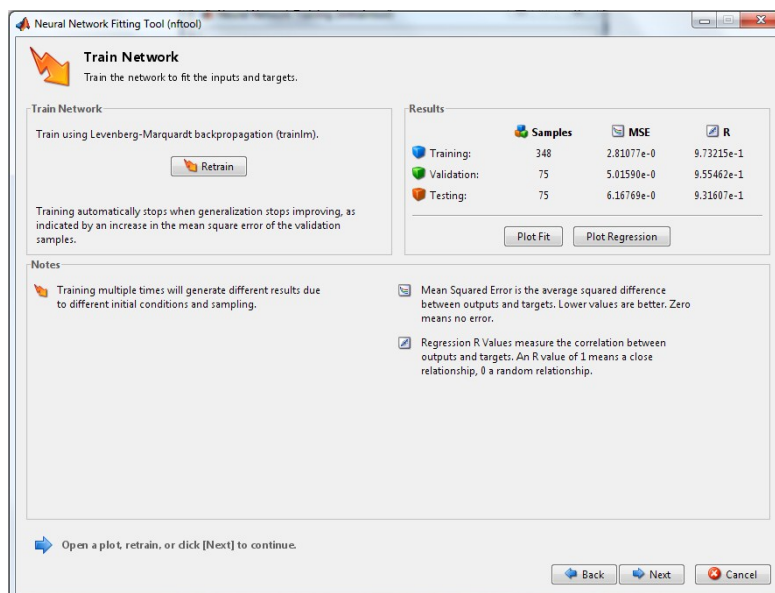


Figura 2.14 – Treino da rede e respectivos resultados

A janela seguinte (Figura 2.15) permitirá, como já referido, treinar novamente a rede, alterar a sua dimensão e/ou avaliar o seu desempenho com outras séries de dados.



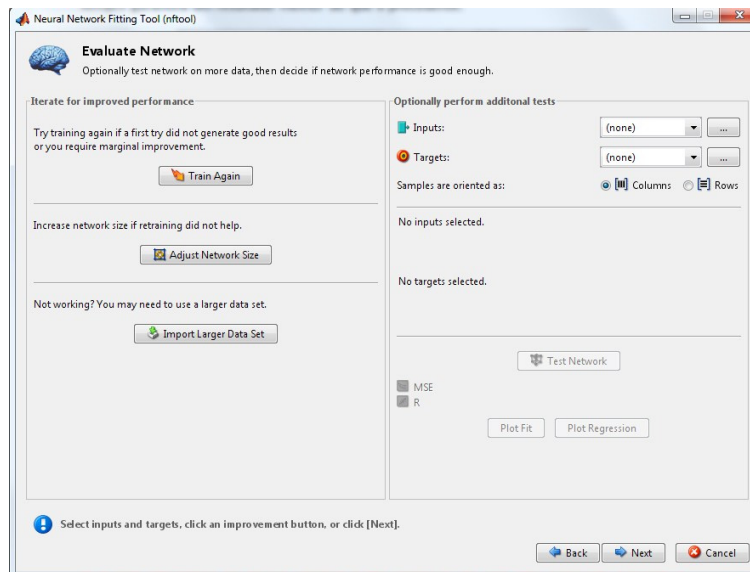


Figura 2.15 – Janela de avaliação da rede

Por último, a janela seguinte (Figura 2.16) permitirá ao utilizador exportar toda a informação da rede criada para o ambiente de trabalho do Matlab. Será, para isso, apenas necessário introduzir os nomes para se identificarem cada uma das variáveis.

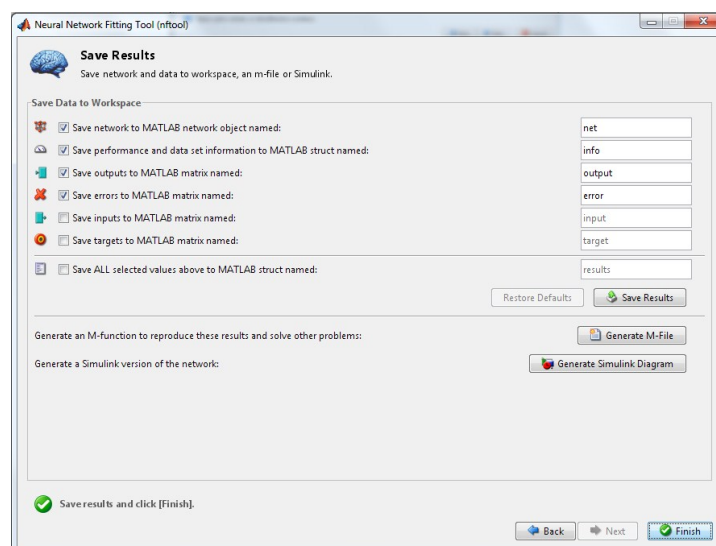


Figura 2.16 – Exportação de resultados

Para concluir a análise a esta ferramenta do Matlab, é importante compreender a arquitectura pré-definida por esta interface gráfica e que, segundo os manuais da aplicação, mais se adequa a problemas de regressão de séries de dados. De acordo com os parâmetros das Redes Neurais Artificiais já referenciados, a Arquitectura da

ferramenta é multicamada com dois níveis distintos, oculto e de saída, sendo designada de tipo *Feedforward*. Como visto anteriormente, o utilizador apenas tem controlo sobre o número de neurónios na camada oculta.

Em cada uma das duas camadas existentes, há funções de activação distintas. À camada oculta é aplicada uma função logística enquanto que, à camada de saída, é aplicada uma função linear. Os parâmetros destas funções foram já introduzidos no capítulo anterior. O treino será realizado pelo algoritmo de Levenberg-Marquardt.

O Matlab possui ainda uma ferramenta mais genérica, também com interface gráfica, aplicada a qualquer tipo de problemas com Redes Neuronais Artificiais e que permite ao utilizador mais experiente um controlo total sobre todos os parâmetros de uma rede. Para a executar, introduz-se o comando *nntool*.

Na janela apresentada na Figura 2.17 é possível introduzir todos os dados necessários à construção da rede, bem como avaliar os resultados de qualquer rede previamente elaborada.

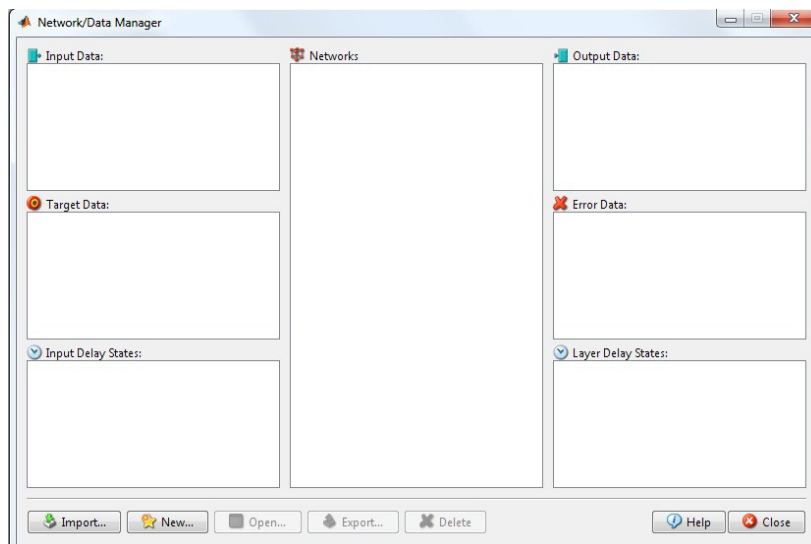


Figura 2.17 – Janela principal da interface avançada da ferramenta de Redes Neuronais

Através do botão *Import* é feita a importação das variáveis de ambiente do Matlab para esta aplicação (Figura 2.18). Após a selecção das variáveis, define-se o seu conteúdo para que o Matlab reconheça a que se referem.

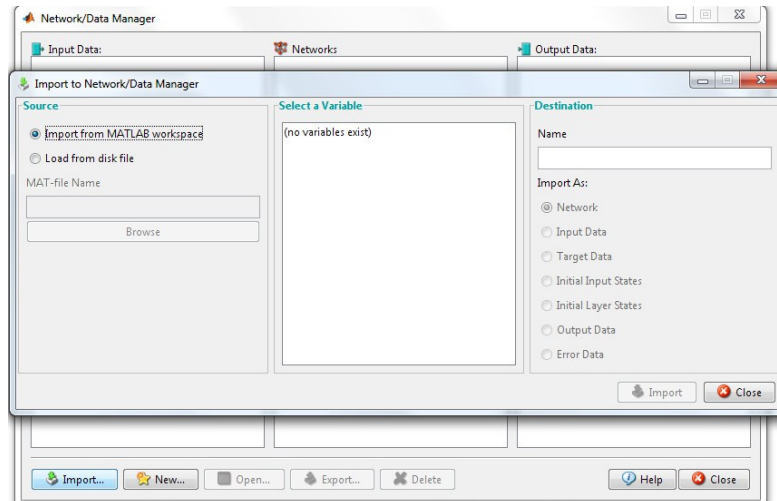


Figura 2.18 – Importação de dados

Depois de introduzidos todos os dados de entrada e de saída, essenciais ao treino de uma RNA, cria-se a rede, utilizando o botão *New*, de acordo com a arquitectura pretendida. Os parâmetros a configurar são apresentados na Figura 2.19.

Depois de configurados os dados necessários a uma RNA, faz-se um duplo clique na rede criada para que sejam disponibilizadas um conjunto de opções associadas à rede e que se apresentam na Figura 2.20. Estas opções permitem o Treino de redes criadas, a Simulação, a Adaptação dos pesos e a sua reinicialização e visualização. Em cada um dos separadores, é possível definir os parâmetros afectos a cada tarefa.

Importa ainda acrescentar que esta aplicação permite, não só a criação de novas redes e tarefas subsequentes, mas também a simulação de redes já criadas, nomeadamente, redes criadas previamente na ferramenta *nftool* e cuja simulação com dados de entrada diferentes apenas poderá ser feita nesta interface gráfica ou, em alternativa, através da linha de comandos. Com o comando *Export* transferem-se os resultados para o ambiente de trabalho do Matlab.

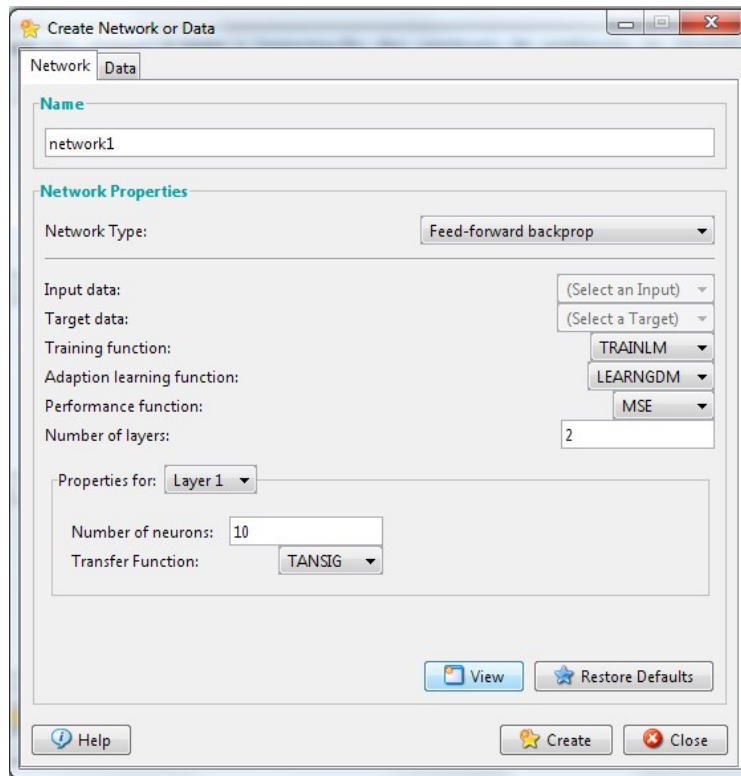


Figura 2.19 – Criação de uma RNA

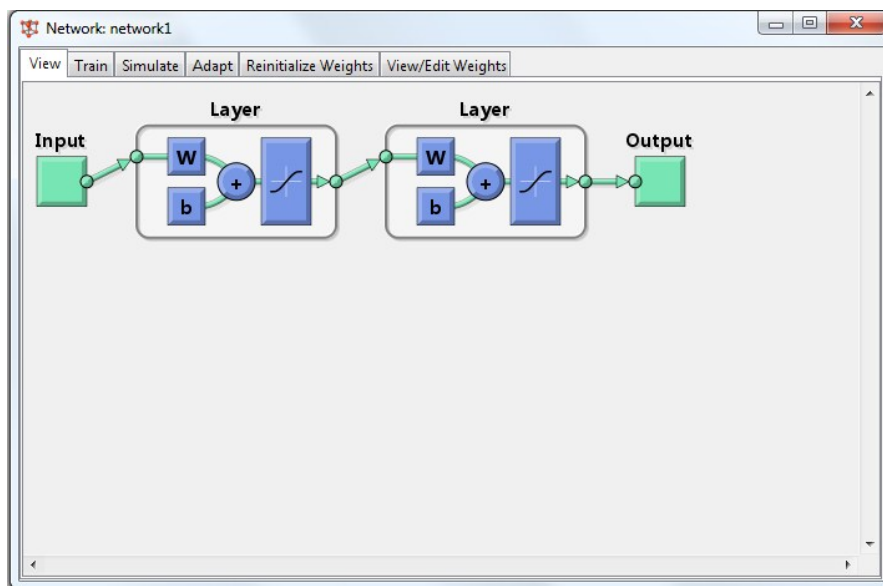


Figura 2.20 – Opções de Redes Neurais



**CAPÍTULO**

# **3** **CARACTERIZAÇÃO DOS MODELOS UTILIZADOS**

*Realizando coisas justas, tornamo-nos justos, realizando coisas moderadas, tornamo-nos moderados, fazendo coisas corajosas, tornamo-nos corajosos.*

Aristóteles

### **3 CARACTERIZAÇÃO DOS MODELOS UTILIZADOS**

A emulação de comportamentos hidrodinâmico e de qualidade de água apresenta duas fases distintas. A primeira envolve a criação de modelos matemáticos das linhas de água a estudar através da utilização do *software* SOBEK. Os resultados destes modelos servirão de treino e de base comparativas com os obtidos pelas Redes Neurais correspondentes. A segunda fase incluirá a criação das Redes Neurais Artificiais com base em resultados do modelo SOBEK.

#### **3.1 MODELO DO RIO CÁVADO**

Os modelos hidrodinâmico e de qualidade da água do rio Cávado foram criados no programa SOBEK. O modelo hidrodinâmico permite simular o escoamento neste rio, tendo sido incluídos os principais afluentes e todas as estruturas hidráulicas, tais como barragens e açudes. No modelo de qualidade da água são consideradas as descargas, que poderão apresentar uma influência significativa na qualidade da água deste rio. Para isso, procedeu-se a um levantamento exaustivo no terreno destas estruturas e de outras informações úteis à criação do modelo e que não fossem identificadas de outra forma.

##### **3.1.1 Modelo Hidrodinâmico**

O modelo unidimensional criado compreende apenas parte do rio Cávado, delimitado pela albufeira da Caniçada e pela sua foz, excluindo igualmente os seus afluentes neste trecho. Embora tenha sido utilizado neste trabalho um trecho do rio Cávado, foi também criado um modelo global que inclui todas as principais linhas de águas superficiais da bacia hidrográfica do rio Cávado e identificadas na Figura 3.1.



Figura 3.1 – Linhas de água do modelo global do rio Cávado (Araújo *et al.*, 2008b)

No Quadro 3.1 apresentam-se algumas das características geométricas do modelo utilizado.

Quadro 3.1 – Extensão do rio e número de estruturas consideradas no modelo hidrodinâmico e de qualidade da água

<b>Linha de água</b>	<b>Extensão (m)</b>	<b>Açudes</b>	<b>Aproveitamentos</b>
Rio Cávado	61780	22	4

As secções transversais dos canais fluviais consideradas no modelo foram definidas a partir de informação batimétrica e topográfica disponível para a bacia hidrográfica do rio Cávado.

O modelo foi discretizado através de uma rede unidimensional com 286 nós de cálculo, 2 fronteiras abertas e 13 descargas controladas. Foram ainda considerados 24 estruturas hidráulicas não controladas.

A geometria foi introduzida considerando-se 111 secções transversais. Foram consideradas 50 localizações com possibilidade de introdução de descargas com



origem em fontes tóxicas de poluição, as quais serão detalhadas mais à frente no presente trabalho.

Foram consideradas as principais estruturas hidráulicas com influência nos regimes fluviais dos rios: açudes e aproveitamentos hidroeléctricos. Os aproveitamentos hidroeléctricos considerados são indicados nas Figuras 3.2 e 3.3.

Os regimes hidrodinâmicos são fundamentalmente influenciados pelas características pluviométricas da bacia e pelos regimes de exploração dos aproveitamentos hidroeléctricos. No estuário do rio Cávado, a acção da maré assume uma influência considerável nas variações de nível de água. Os aproveitamentos a fio de água, embora não tendo capacidade de regularização considerável, implicam variações locais dos níveis a montante das respectivas obras de retenção.

Os fluxos fluviais dependem, na estação húmida, do contributo próprio da bacia e dos caudais libertados nas barragens e, na estação seca, dependem essencialmente dos caudais turbinados nos aproveitamentos hidroeléctricos.

Nas proximidades de fontes tóxicas de poluição conhecidas é considerada a possibilidade de introduzir uma descarga no nó da respectiva linha de água mais próxima. Os contributos das fontes de poluição difusa são considerados nas fronteiras abertas de cada linha de água e distribuídos pelas descargas pontuais ao longo das linhas de água.

Tal como já exposto, o modelo geométrico utilizado corresponde ao trecho compreendido entre a albufeira da Caniçada e a Foz do rio Cávado, não sendo incorporados quaisquer afluentes a este rio. Este modelo reduzido, para além de permitir um melhor controlo sobre as variáveis do problema, permite também a utilização de dados reais de monitorização para a simulação uma vez que, neste trecho, se encontra o maior número de registos nas respectivas estações.



Figura 3.2 – Localização dos aproveitamentos hidroeléctricos

## Rio Cávado

Caniçada



Ponte do Bico



Ruães



Penide



Figura 3.3 – Fotografias das barragens de aproveitamentos hidroeléctricos no rio Cávado

Na Figura 3.4 encontra-se definido o esquema conceptual do modelo.



Figura 3.4 - Trecho do modelo hidrodinâmico SOBEK utilizado na emulação

As condições de fronteira do modelo (albufeira da Caniçada e Foz) e as variáveis que definem as estruturas (Ponte do Bico, Ruães e Penide) estão indicadas na Figura 3.4 e, no Quadro 3.2, os respectivos valores utilizados na simulação.

Quadro 3.2 – Condições de fronteira e variáveis do modelo hidrodinâmico SOBEK

N.º ESTRUTURA	DESIGNAÇÃO	VARIÁVEL	VALOR
1	Albufeira da Caniçada	Caudal efluente (m <sup>3</sup> /s)	Variável
		Abertura da comporta 1 (m)	2,00
		Abertura da comporta 2 (m)	2,00
		Abertura da comporta 3 (m)	2,00
2	Aproveitamento da Ponte do Bico	Abertura da comporta 4 (m)	2,00
		Abertura da comporta 5 (m)	2,00
		Abertura da comporta 6 (m)	2,00
		Abertura da comporta 7 (m)	2,00
		Abertura da turbina (m)	0,50
3	Aproveitamento de Ruães	Abertura da turbina (m)	0,50
		Abertura da comporta 1 (m)	2,00
4	Aproveitamento de Penide	Abertura da comporta 2 (m)	2,00
		Abertura da turbina 1 (m)	1,00
		Abertura da turbina 2 (m)	1,00
5	Maré	Nível (m)	1,00

Neste modelo, a condição de fronteira associada ao caudal efluente da barragem da Caniçada varia ao longo do período da simulação, de acordo com os valores registados pela respectiva estação de monitorização no período de Janeiro a Novembro de 2000 (Figura 3.5). Na outra condição de Fronteira, nível da maré na Foz, atribui-se um valor constante de 1m.

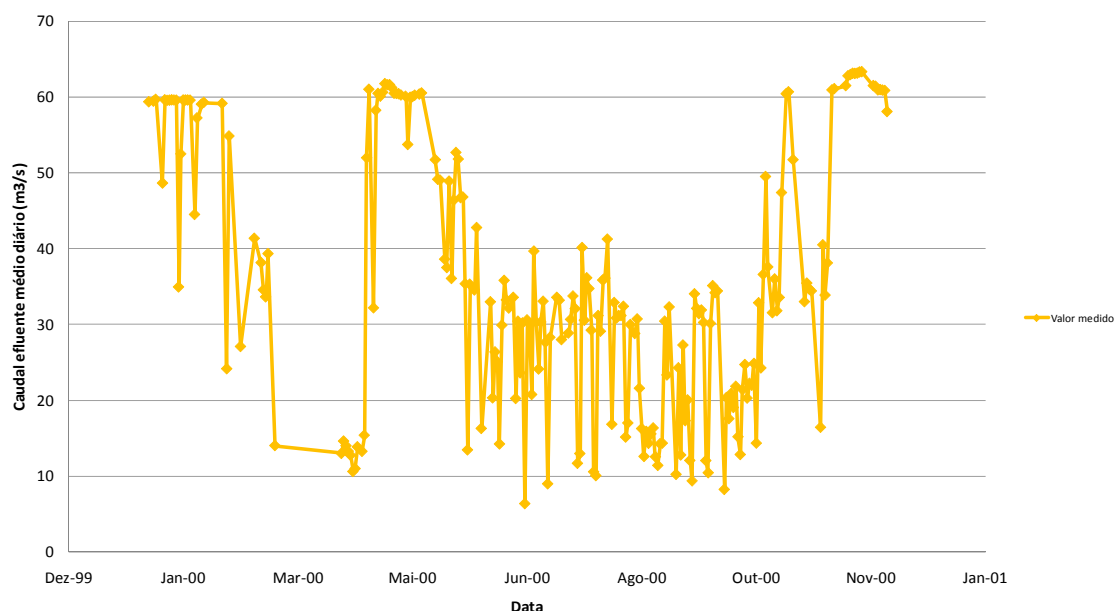


Figura 3.5 - Série de valores monitorizados de caudal efluente médio diário na barragem da Caniçada (Janeiro a Novembro de 2000)

Nas restantes variáveis do modelo, associadas essencialmente a abertura de comportas em descarregadores, adoptou-se a abertura máxima para que o caudal afluente, nestas estruturas, fosse igual ao efluente, oferecendo a mínima resistência possível ao escoamento. Importa ainda referir que, por opção de construção do modelo, optou-se por considerar também um descarregador nas estruturas associadas a aproveitamentos hidroeléctricos.

A simulação foi realizada para um período compreendido entre 10 de Janeiro de 2000 e 27 de Novembro de 2000, com um intervalo de tempo para o cálculo de 6 horas. Foi também definido um nível inicial de água de 1m para toda a extensão de canal do modelo (condição inicial).

### 3.1.2 Modelo de Qualidade da água

Na aplicação do SOBEK à resolução de problemas de qualidade da água, é sempre necessário ter como base um modelo hidrodinâmico. Ao modelo apresentado no ponto anterior deste capítulo, serão adicionadas fontes tóxicas de poluição que permitirão simular descargas na linha de água e assim avaliar o seu impacto na qualidade da água do rio.

Como já referido, as simulações relacionadas com a qualidade da água são baseadas nas simulações hidrodinâmicas anteriormente apresentadas e resultam da adopção de diferentes características para as descargas consideradas no modelo criado: ETAR, indústrias, vacarias e outras contribuições. O estabelecimento de diferentes valores para as variáveis indicadas resulta em cenários de simulação distintos. O modelo permite criar um número ilimitado de simulações, considerando diferentes condições hidrodinâmicas nas linhas de água e diferentes condições para as descargas.

As características qualitativas das descargas das ETAR foram estimadas para os seguintes parâmetros: carência bioquímica de oxigénio, oxigénio dissolvido, coliformes totais, coliformes fecais e estreptococos fecais. Para definir a carga poluente afluente a cada uma das ETAR no que respeita aos parâmetros indicados, foi utilizada a seguinte metodologia: consultou-se a base de dados do INSAAR para as ETAR relativa ao ano de

2005, utilizando-se a população total servida e o volume anual afluente, e recorreu-se a valores apresentados em bibliografia para a definição das cargas específicas por habitante para cada parâmetro de qualidade. Para a  $CBO_5$ , adoptou-se um valor de 60g/dia/hab, amplamente difundido na literatura e fixado no Decreto-Lei nº152/97 de 19 de Junho para o cálculo do equivalente populacional. Para as variáveis bacteriológicas utilizou-se uma capitação de  $4 \times 10^9$  NMP/hab/dia para coliformes totais (Eça, 2007) e  $2 \times 10^9$  NMP/hab/dia (Pinho, 2000) para coliformes fecais. A carga de estreptococos fecais foi definida, considerando-se um valor de 10% do valor total de coliformes fecais. Com base nestas capitações e na população total servida estimou-se a carga total afluente às ETAR.

O grau de tratamento das ETAR consideradas no modelo da bacia hidrográfica do Cávado é, maioritariamente, secundário, existindo apenas uma com tratamento primário (ETAR de Moure). Para as ETAR privadas não há informação disponível pelo que não foi considerada qualquer descarga nas simulações realizadas. Para a ETAR com tratamento primário, considerou-se uma remoção média de  $CBO_5$  e uma inactivação de coliformes de 30% (Vieira, 1986). Para as ETAR com tratamento secundário a remoção média de  $CBO_5$  adoptada foi de 89% e a remoção de coliformes foi de 75% para os coliformes (Vieira, 1986).

Considerou-se ainda que a concentração de OD seria 0 mg/L e a temperatura das descargas seria igual à temperatura da água do rio no local da descarga. Por último, assumiu-se que o balanço hídrico em todas as ETAR seria nulo, ou seja, o caudal efluente será, em todas as situações, igual ao afluente.

Na Figura 3.6 apresenta-se a localização aproximada de todas as ETAR previstas no modelo de qualidade da água a emular. As que constam do esquema mas não se encontram listadas no quadro, estão incluídas no modelo mas não possuem registos de valores.

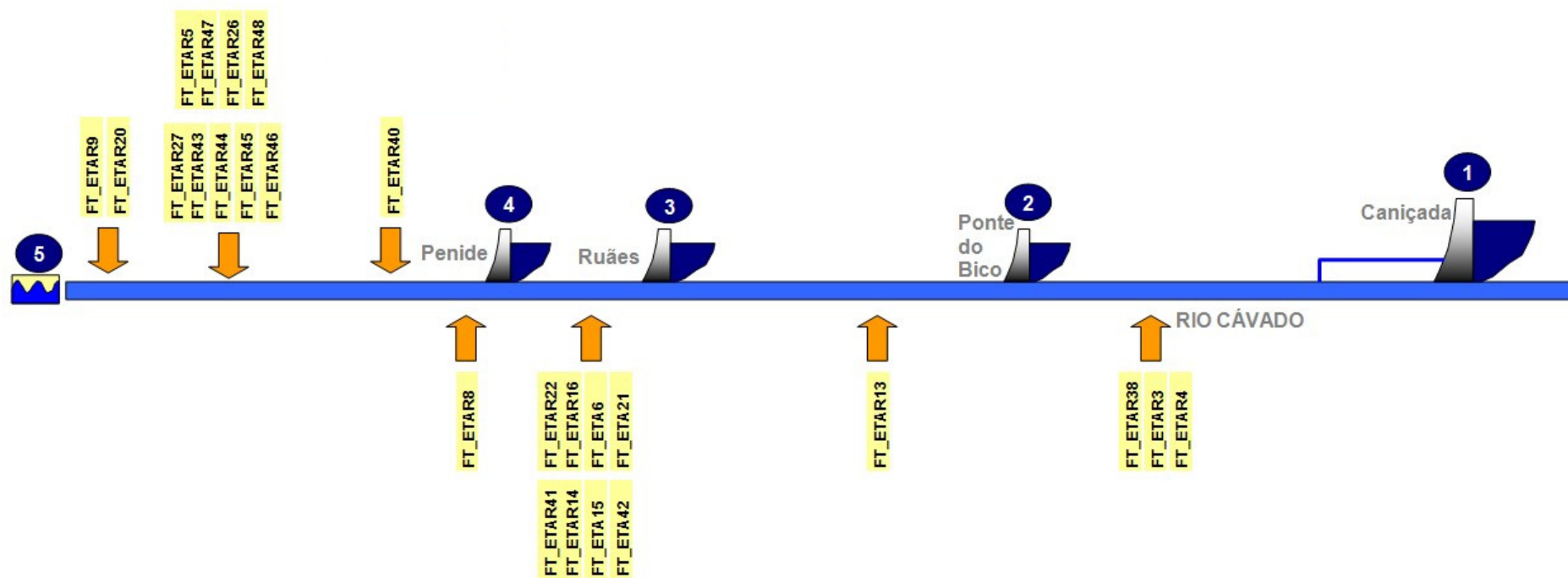


Figura 3.6 – Fontes tóxicas de poluição: ETAR com descargas consideradas

A estimação das cargas associadas às actividades industriais revelou-se uma tarefa difícil, uma vez que não existe informação sobre os efluentes das indústrias licenciadas. A única informação disponível, na base de dados dessas indústrias, refere-se a informação exclusivamente quantitativa. Na impossibilidade de realizar um trabalho exaustivo de levantamento, utilizou-se um método indirecto que consiste na utilização de coeficientes representativos da carga poluente produzida num determinado sector industrial. Foram adoptados os coeficientes apresentados nos Planos de Bacia hidrográfica (PBH) dos rios Lis e Vouga (Quadro 3.3), baseados em informação recolhida na área de estudo e coeficientes específicos extraídos de estudos como CARTAXO *et al.* (1985).

Quadro 3.3 – Coeficientes específicos de emissão para as actividades industriais

CAE	Sector de actividade	Caudal (m <sup>3</sup> /dia/trab)	CBO <sub>5</sub> (Kg/dia)
3111	Abate de animais	1,57	2,35
3211	Prep. e fiação de fibras, tecel. e acab. de tecidos	0,10	0,15
3212	Confeção de obras têxteis	0,05	0,03
3320	Fabricação de mobiliário, portas, janelas	0,02	0,00
51341	Armazém de Vinhos-Produtor	2,00	3,00
51341	Armazém de Vinhos	0,50	0,25
351312	Fab. de polímeros, PVC, etc.	0,60	1,80
369930	Fab. de artigos de cimento e de marmorite	0,04	0,01
381130	Serralharia civil, tornearia, ferraria e afins	0,03	0,00
951300	Oficina de reparação de automóveis	0,05	0,07

Utilizando o caudal médio descarregado por trabalhador e por actividade industrial, estimou-se o número de trabalhadores de cada empresa, utilizando-se o valor do caudal rejeitado (valor da base de dados de licenciamento).

A carga bacteriológica dos efluentes industriais foi definida a partir do número de trabalhadores estimado. Esta metodologia apresentou bons resultados para a generalidade das indústrias excepto para actividades como tinturarias ou acabamentos de tecidos, devido aos elevados caudais de rejeição permitidos pela licença atribuída, o que se traduziu num número irrealista de trabalhadores. Nesses casos optou-se por considerar o número de trabalhadores igual à média do número de trabalhadores das empresas do mesmo ramo de actividade.

Na Figura 3.7 apresenta-se a localização aproximada de todas as indústrias consideradas no modelo de qualidade da água construído para o rio Cávado.



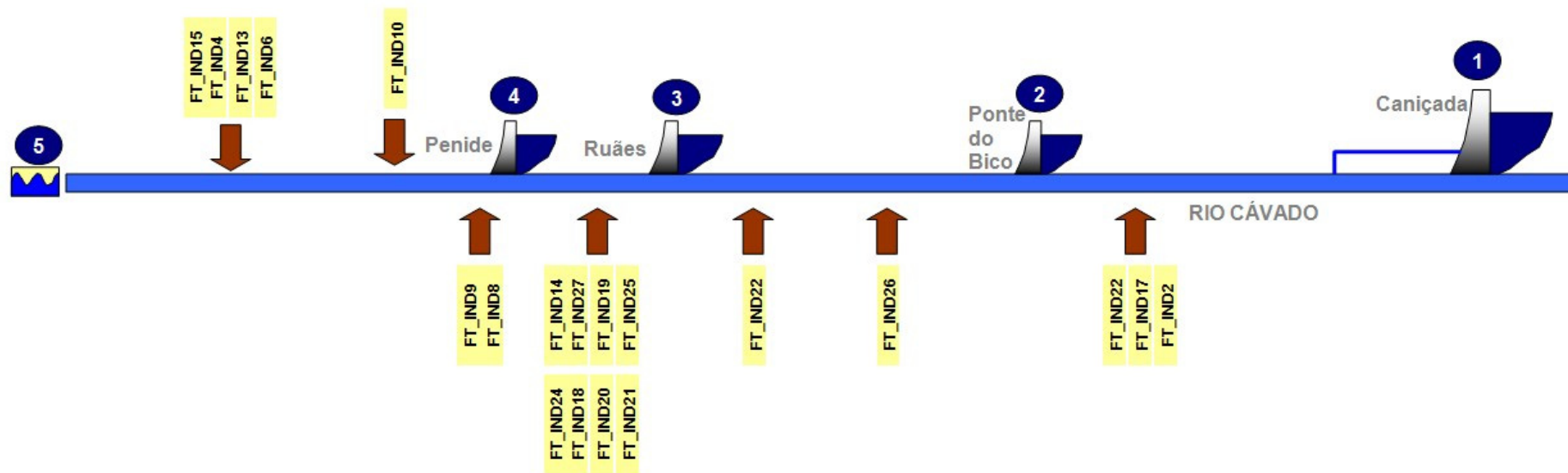


Figura 3.7 – Fontes tóxicas de poluição: indústrias com descargas consideradas

Na estimativa das cargas efluentes de vacarias utilizou-se um processo simplificado no que diz respeito à carga de CBO<sub>5</sub>, uma vez que da base de dados de licenças atribuídas consta apenas o número de cabeças de gado bovino por exploração. Segundo o PBH do rio Sado cada vacaria produz, por animal equivalente, 35L/dia de caudal e 450g/dia de CBO<sub>5</sub>. Para encontrar os valores dos caudais rejeitados e cargas de CBO<sub>5</sub>, multiplicou-se os valores das respectivas capitações pelo número de efectivos em cada exploração. Em relação à carga de coliformes utilizou se a carga de coliformes totais e fecais em suiniculturas e para animais equivalentes de 45Kg que consta do PBH do rio Sado (1999). O Quadro 3.4 indica o número de efectivos para cada uma das vacarias consideradas.

Quadro 3.4 – Número de efectivos nas vacarias consideradas

ID_MODELO	Designação	Efectivos
FT_VAC1	Albino Martins Branco	56
FT_VAC2	António Eugénio Costa Maciel	40
FT_VAC3	António José Pereira Ferreira	50
FT_VAC7	Fernando Castro Alves	93
FT_VA12	Manuel Novais da Silva	30
FT_VAC13	Manuel Sá Faria	68
FT_VAC16	Sociedade Agro-Pecuária Barbosas, Lda	240
FT_VAC17	Sociedade Agro-Pecuária Irmãos Marques, Lda	80

Na Figura 3.8 apresenta-se a localização aproximada de todas as vacarias consideradas no modelo de qualidade da água construído para o rio Cávado (Araújo *et al.*, 2007b).

O modelo de qualidade da água no programa SOBEK tem, tal como já referido, uma base hidrodinâmica igual à apresentada no ponto 3.1.1, pelo que se considera que o modelo espacial, as estruturas, condições de fronteira e condições iniciais são as mesmas. O período de simulação e o intervalo e tempo para o cálculo também são iguais.

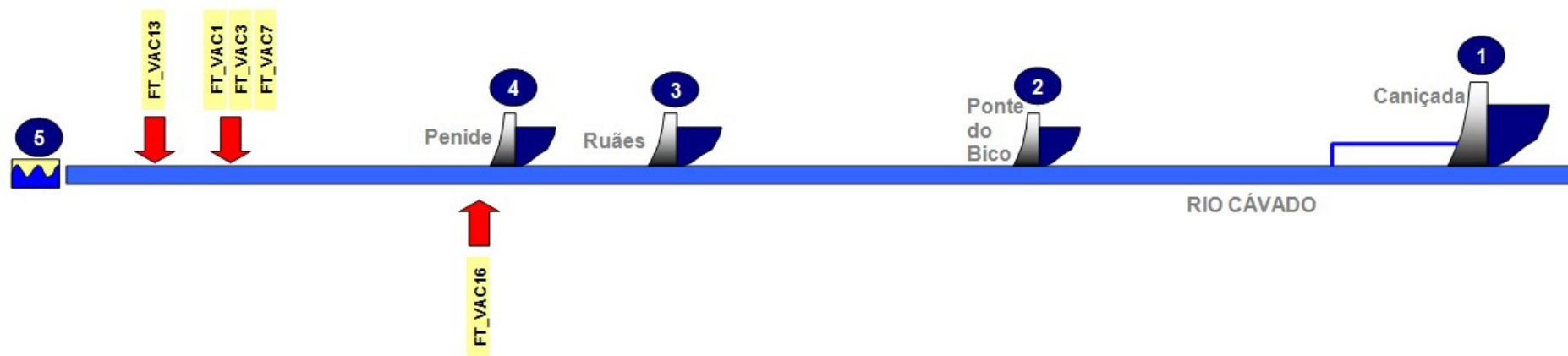


Figura 3.8 – Fontes tóxicas de poluição: vacarias com descargas consideradas

Definindo a hidrodinâmica do modelo será, por isso, necessário avançar para os parâmetros de qualidade da água necessários à execução do modelo SOBEM. Em primeiro lugar seleccionou-se a CBO<sub>5</sub>, OD, Coliformes Totais, Coliformes Fecais e Streptococos Fecais como as variáveis do modelo de qualidade de água, de acordo com o apresentado. Os parâmetros dos processos associados a cada uma das substâncias ficaram com os valores definidos por defeito pelo programa porque, neste trabalho, não se pretende avaliar a qualidade dos algoritmos e dos modelos criados, mas sim a sua emulação por RNA.

Após a definição das variáveis e tendo já o modelo espacial definido, incluíram-se as fontes tóxicas no modelo, de acordo com as Figuras 3.6 a 3.8, no trecho definido pelo modelo hidrodinâmico e apresentado na Figura 3.4.

As fronteiras do modelo relativas ao módulo de qualidade são as já definidas para o módulo de hidrodinâmica havendo, no entanto, que definir as respectivas concentrações das variáveis. As características da água relativamente às variáveis em estudo nestas fronteiras são apresentadas no Quadro 3.5, enquanto que as fontes tóxicas, cujas cargas poluentes foram determinadas pelas metodologias detalhadas anteriormente, são apresentadas nos Quadros 3.6 e 3.7. Acrescenta-se ainda que foram criados dois cenários distintos para as descargas nas fontes tóxicas. Um com eficiência média de tratamento em todas as ETAR e outro onde ocorre uma descarga de emergência da ETAR de Frossos (efluente sem qualquer tratamento). Nas fronteiras a informação utilizada é igual em ambos os cenários, correspondendo, na albufeira Caniçada, à média dos registos de monitorização das variáveis em estudo. Na Foz, por não influenciar o resultado no local de medição, considerou-se uma água apenas com uma concentração de 10mg/L de OD.

Quadro 3.5 – Características da água nas Fronteiras do modelo SOBEK

CENÁRIOS 1 e 2								
ID_MODELO	Designação	Caudal (L/s)	Nível (m)	CBO <sub>5</sub> (mg/L)	OD (mg/L)	Estrept. Fecais (NMP/m <sup>3</sup> )	Colif. Fecais (NMP/m <sup>3</sup> )	Colif. Totais (NMP/m <sup>3</sup> )
CANICADA	Qualidade da água na albufeira da Caniçada	Variável	-	1,20	9,46	3,85E+05	8,42E+05	4,98E+06
FRONTJ	Qualidade da água na Foz do modelo	-	1,00	0,00	10,00	0	0	0

Quadro 3.6 – Características das Fontes Tópicas consideradas no modelo de qualidade da água (Cenário 1)

CENÁRIO 1						
ID_MODELO	Designação	Caudal (L/s)	CBO <sub>5</sub> (mg/L)	Estrept. Fecais (NMP/m <sup>3</sup> )	Colif. Fecais (NMP/m <sup>3</sup> )	Colif. Totais (NMP/m <sup>3</sup> )
FT_ETAR3	Amares	5,58	46,32	3,51E+08	3,51E+09	7,02E+09
FT_ETAR4	Santa Maria do Bouro	0,48	146,50	1,11E+09	1,11E+10	2,22E+10
FT_ETAR5	Vila Frescainha	46,86	50,77	3,85E+08	3,85E+09	7,69E+09
FT_ETAR6	Ucha (Gandra)	0,28	55,05	4,17E+08	4,17E+09	8,34E+09
FT_ETAR8	Areias de Vilar	0,14	47,30	3,58E+08	3,58E+09	7,17E+09
FT_ETAR9	Esposende	20,02	44,42	3,37E+08	3,37E+09	6,73E+09
FT_ETAR13	Palmeira	9,59	55,76	4,22E+08	4,22E+09	8,45E+09
FT_ETAR14	Frossos	153,32	55,76	4,22E+08	4,22E+09	8,45E+09
FT_ETAR15	Ruaes	9,16	54,20	4,11E+08	4,11E+09	8,21E+09
FT_ETAR16	Cabreiros	4,71	66,17	5,01E+08	5,01E+09	1,00E+10
FT_ETAR20	Fao (Compacta)	0,62	16,56	1,25E+08	1,25E+09	2,51E+09
FT_ETAR21	Oliveira	0,51	53,93	4,09E+08	4,09E+09	8,17E+09
FT_ETAR22	Pousa	0,23	39,15	2,97E+08	2,97E+09	5,93E+09
FT_ETAR26	Barcelinhos	1,39	50,77	3,85E+08	3,85E+09	7,69E+09
FT_ETAR27	Carvema	0,75	22,14	1,68E+08	1,68E+09	3,35E+09
FT_ETAR38	Adaufe (Parque industrial)	2,64	14,44	1,09E+08	1,09E+09	2,19E+09
FT_IND2	Sapecal-Sociedade Agro-Pecuaria do Cavado	0,69	39,17	4,22E+07	4,22E+08	8,44E+08
FT_IND4	Antonio Barroso Malhas, Lda	19,44	0,09	8,73E+06	8,73E+07	1,75E+08
FT_IND13	Quinta e Santos, Lda	0,28	6,25	6,67E+08	6,67E+09	1,33E+10
FT_IND14	Sogrape - Vinhos de Portugal, S.A.	0,12	25,00	1,33E+08	1,33E+09	2,67E+09
FT_IND15	Tinamar-Tinturaria e Acabamentos Texteis, Lda	23,15	0,08	7,33E+06	7,33E+07	1,47E+08
FT_IND17	Aluminios Navarra, S.A.	1,39	0,00	3,67E+07	3,67E+08	7,33E+08
FT_IND18	Carpincasais - Sociedade Tecnica de Carpintarias, S.A.	0,17	0,00	2,93E+08	2,93E+09	5,87E+09
FT_IND19	Desicolor-Motivos Decorativos Texteis, Lda	6,94	0,25	2,22E+07	2,22E+08	4,44E+08
FT_IND21	Moda 21 - Acabamentos Texteis, Lda	9,72	0,18	1,75E+07	1,75E+08	3,49E+08
FT_IND22	Posterede-Postes Electricos, Lda	0,01	0,00	2,20E+09	2,20E+10	4,40E+10
FT_IND23	Quinta da Casa de Penela - Sociedade Vinicola, Lda	0,05	750,00	3,33E+07	3,33E+08	6,67E+08
FT_IND24	Saniflex-Artigos Sanitarios, Lda	0,03	600,00	1,11E+08	1,11E+09	2,22E+09
FT_IND26	Joao Fernandes da Silva	1,22	0,29	1,40E+08	1,40E+09	2,79E+09
FT_VAC1	Albino Martins Branco	0,02	12857,14	3,37E+07	3,37E+08	9,53E+08
FT_VAC3	António José Pereira Ferreira	0,02	12857,14	3,78E+07	3,78E+08	1,07E+09
FT_VAC7	Fernando Castro Alves	0,04	12857,14	2,03E+07	2,03E+08	5,74E+08
FT_VAC13	Manuel Sá Faria	0,03	12857,14	2,78E+07	2,78E+08	7,85E+08
FT_VAC16	Sociedade Agro-Pecuária Barbosas, Lda	0,10	12857,14	7,87E+06	7,87E+07	2,22E+08

Quadro 3.7 – Características das Fontes Tópicas consideradas no modelo de qualidade da água (Cenário 2)

CENÁRIO 2						
ID_MODELO	Designação	Caudal (L/s)	CBO <sub>5</sub> (mg/L)	Estrept. Fecais (NMP/m <sup>3</sup> )	Colif. Fecais (NMP/m <sup>3</sup> )	Colif. Totais (NMP/m <sup>3</sup> )
FT_ETAR3	Amares	5,58	46,32	3,51E+08	3,51E+09	7,02E+09
FT_ETAR4	Santa Maria do Bouro	0,48	146,50	1,11E+09	1,11E+10	2,22E+10
FT_ETAR5	Vila Frescainha	46,86	50,77	3,85E+08	3,85E+09	7,69E+09
FT_ETAR6	Ucha (Gandra)	0,28	55,05	4,17E+08	4,17E+09	8,34E+09
FT_ETAR8	Areias de Vilar	0,14	47,30	3,58E+08	3,58E+09	7,17E+09
FT_ETAR9	Esposende	20,02	44,42	3,37E+08	3,37E+09	6,73E+09
FT_ETAR13	Palmeira	9,59	55,76	4,22E+08	4,22E+09	8,45E+09
<b>FT_ETAR14</b>	<b>Frossos</b>	<b>153,32</b>	<b>506,94</b>	<b>1,69E+09</b>	<b>1,69E+10</b>	<b>3,38E+10</b>
FT_ETAR15	Ruaes	9,16	54,20	4,11E+08	4,11E+09	8,21E+09
FT_ETAR16	Cabreiros	4,71	66,17	5,01E+08	5,01E+09	1,00E+10
FT_ETAR20	Fao (Compacta)	0,62	16,56	1,25E+08	1,25E+09	2,51E+09
FT_ETAR21	Oliveira	0,51	53,93	4,09E+08	4,09E+09	8,17E+09
FT_ETAR22	Pousa	0,23	39,15	2,97E+08	2,97E+09	5,93E+09
FT_ETAR26	Barcelinhos	1,39	50,77	3,85E+08	3,85E+09	7,69E+09
FT_ETAR27	Carvema	0,75	22,14	1,68E+08	1,68E+09	3,35E+09
FT_ETAR38	Adaufe (Parque industrial)	2,64	14,44	1,09E+08	1,09E+09	2,19E+09
FT_IND2	Sapecal-Sociedade Agro-Pecuaria do Cavado	0,69	39,17	4,22E+07	4,22E+08	8,44E+08
FT_IND4	Antonio Barroso Malhas, Lda	19,44	0,09	8,73E+06	8,73E+07	1,75E+08
FT_IND13	Quinta e Santos, Lda	0,28	6,25	6,67E+08	6,67E+09	1,33E+10
FT_IND14	Sogrape - Vinhos de Portugal, S.A.	0,12	25,00	1,33E+08	1,33E+09	2,67E+09
FT_IND15	Tinamar-Tinturaria e Acabamentos Texteis, Lda	23,15	0,08	7,33E+06	7,33E+07	1,47E+08
FT_IND17	Aluminios Navarra, S.A.	1,39	0,00	3,67E+07	3,67E+08	7,33E+08
FT_IND18	Carpincasais - Sociedade Tecnica de Carpintarias, S.A.	0,17	0,00	2,93E+08	2,93E+09	5,87E+09
FT_IND19	Desicolor-Motivos Decorativos Texteis, Lda	6,94	0,25	2,22E+07	2,22E+08	4,44E+08
FT_IND21	Moda 21 - Acabamentos Texteis, Lda	9,72	0,18	1,75E+07	1,75E+08	3,49E+08
FT_IND22	Posterede-Postes Electricos, Lda	0,01	0,00	2,20E+09	2,20E+10	4,40E+10
FT_IND23	Quinta da Casa de Penela - Sociedade Vinicola, Lda	0,05	750,00	3,33E+07	3,33E+08	6,67E+08
FT_IND24	Saniflex-Artigos Sanitarios, Lda	0,03	600,00	1,11E+08	1,11E+09	2,22E+09
FT_IND26	Joao Fernandes da Silva	1,22	0,29	1,40E+08	1,40E+09	2,79E+09
FT_VAC1	Albino Martins Branco	0,02	12857,14	3,37E+07	3,37E+08	9,53E+08
FT_VAC3	António José Pereira Ferreira	0,02	12857,14	3,78E+07	3,78E+08	1,07E+09
FT_VAC7	Fernando Castro Alves	0,04	12857,14	2,03E+07	2,03E+08	5,74E+08
FT_VAC13	Manuel Sá Faria	0,03	12857,14	2,78E+07	2,78E+08	7,85E+08
FT_VAC16	Sociedade Agro-Pecuária Barbosas, Lda	0,10	12857,14	7,87E+06	7,87E+07	2,22E+08

### 3.2 MODELOS RNA

Para além da compreensão dos factores que influenciam uma Rede Neuronal e já referidos anteriormente, tais como a formulação matemática, as estruturas, a aprendizagem, o *software* a aplicar, etc., é necessário avaliar a sua aplicação e definição bem como estimar um conjunto de outros factores que determinam o funcionamento e eficiência de uma RNA,

Para definir a estrutura da RNA, dentro das opções disponíveis na ferramenta Matlab, foi realizada uma análise exaustiva para determinar qual o melhor conjunto de parâmetros da RNA, o tipo de redes e a informação a utilizar. Nesta análise, foram testadas todas as opções para cada parâmetro, utilizando os mesmos dados de entrada e saída, comparando o seu desempenho através do coeficiente de correlação. Para que este processo fosse possível seleccionou-se um conjunto de informação

relativa a dados de monitorização hidrodinâmica e de qualidade da água na bacia hidrográfica do rio Cávado.

### 3.2.1 Dados de monitorização da Bacia do rio Cávado

Nesta fase de selecção de dados para a avaliação de parâmetros da rede, foi necessário um levantamento das estações existentes na bacia e que, simultaneamente, se encontrassem em funcionamento e cujos dados fossem compatíveis, ou seja, com características espaciais e temporais semelhantes. No Quadro 3.8 é possível identificar todas as estações hidrométricas e meteorológicas de acordo com os critérios e compatibilidade especificados.

Quadro 3.8 - Estações hidrométricas e meteorológicas da bacia do rio Cávado

HIDROMÉTRICA			METEOROLÓGICA		
Nome	Código	Obs.	Nome	Código	Obs.
Alto Cávado	03J/02AE	Sem registos			
Alto Cávado (derivação)	03J/01H	Rejeitada	Sezelhe	03J/01UH	Seleccionada
Alto Cávado(rio)	03J/06H	Seleccionada			
Abelheira (Canal)	03J/02H	Seleccionada	Outeiro	03J/02UG	Seleccionada
Cabreira (total)	04J/07H	Seleccionada	Zebraal	04I/03UG	Seleccionada
Cabreira (derivação)	04J/02H	Rejeitada	Venda Nova	03J/07G	Sem registos
Covas	03H/04H	Seleccionada	Cibões	03/05UG	Seleccionada
Real	04G/06H	Sem registos	Gondizalves	04G/06C	Rejeitada
Ponte Caldelas	03G/05H	Sem registos	Caldelas	03G/04UG	Rejeitada
Padim da Graça	04G/04H	Sem registos			
Portuzelo	04G/05H	Sem registos	Ucha	04F/03UG	Rejeitada
Hidroeléctrica de Ruães	05G/01AE	Sem registos			
Barcelos	04F/02H		Barcelos	04F/01C	Seleccionada
Penide (Central)	04F/01H	Sem registos			
Esposende	04E/01H	Sem registos	Esposende	04E/02UG	Rejeitada

Nas estações sem registos, tal como a observação indica, não foram encontrados dados. Para além das anteriores também foram excluídas estações por se encontrarem mais distantes e/ou com menos informação relativamente a outras disponíveis.

Importa também acrescentar que as séries de Caudal Médio Diário das estações hidrométricas apenas acompanhavam as séries de Precipitação das estações meteorológicas até finais do ano de 2004, não sendo possível utilizar dados de precipitação registados após esta data.

Após a compatibilização de todas as séries de dados retiradas, foi seleccionado, para este teste e seguintes, o par composto pelas estações de Covas e Cibões por possuírem mais registos de Caudal e Precipitação, respectivamente. Optou-se por uma série de dados relativa a um ano, sendo o de 2001 aquele que possuía mais registos.

Por formarem o par de estações hidrométrica/meteorológica com mais dados, ainda que com menor número de variáveis, as estações Covas e Cibões foram utilizadas para os testes mais simples, apenas com duas variáveis (uma de entrada e outra de saída), e de análise de sensibilidade de variáveis no modelo RNA. A estação de Barcelos, por apresentar um conjunto de variáveis monitorizadas mais extenso foi utilizada para testes mais complexos realizados após os mais simples.

As Figuras 3.9 e 3.10 contêm toda a informação relativa a Caudais Médios Diários e Precipitação Diária retirada das estações de monitorização da Bacia Hidrográfica do rio Cávado.

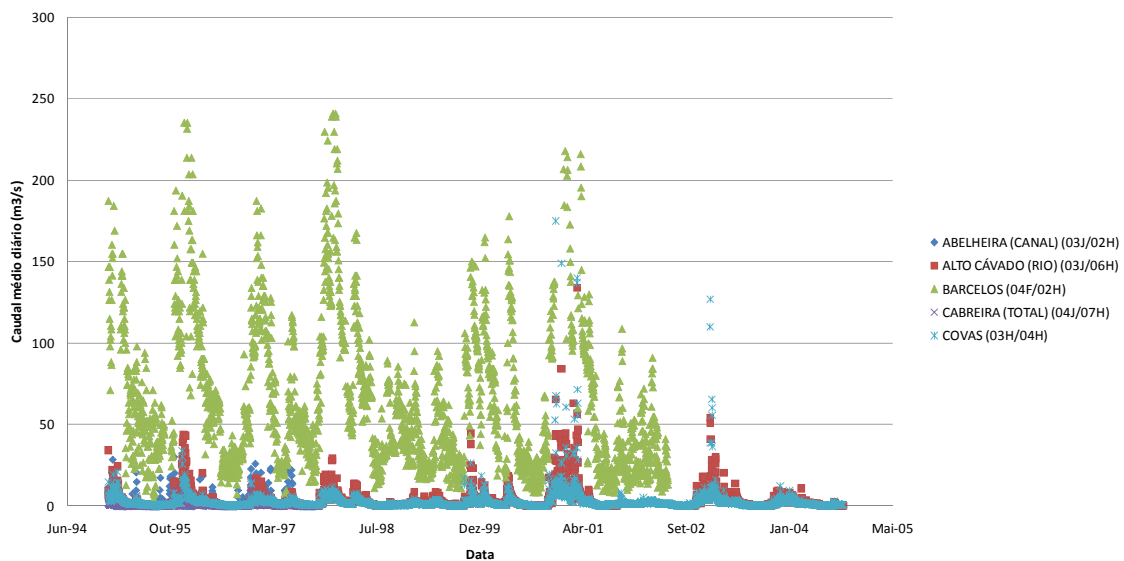


Figura 3.9 - Séries de Caudal Médio Diário registadas na Bacia do rio Cávado



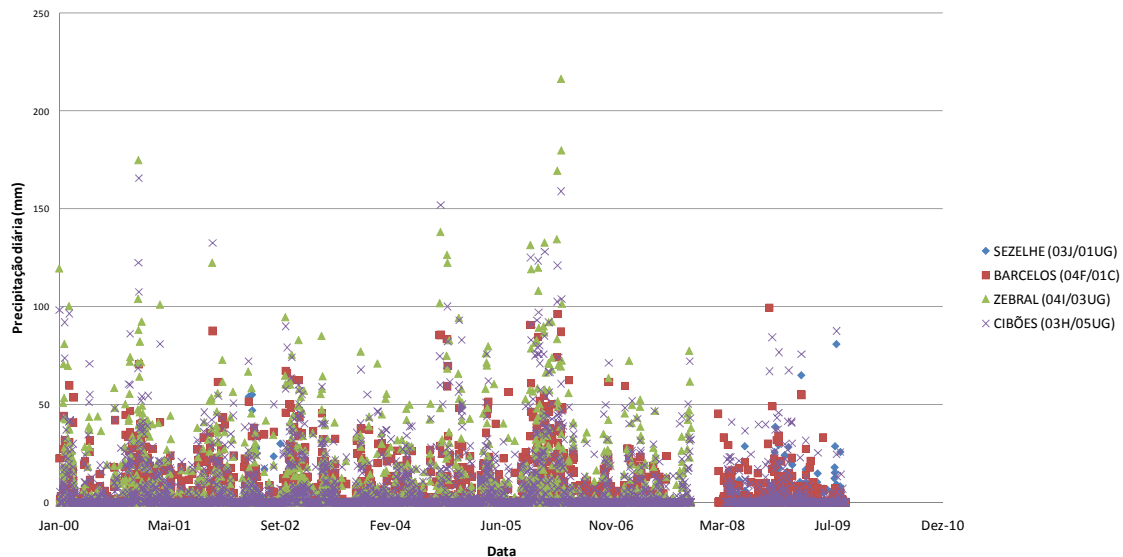


Figura 3.10 - Séries de Precipitação diária registadas na Bacia do rio Cávado

### 3.2.2 Parâmetros e Estrutura da RNA

A definição dos parâmetros que melhor se ajustam a um conjunto de dados de um modelo RNA é vital para o seu desempenho (França *et al.*, 2010). Para tal, decidiu-se introduzir algumas simulações utilizando diferentes opções, dentro da gama disponível na ferramenta *Matlab*, para a construção da rede. Estas caracterizaram-se pela utilização da mesma função de treino Levenberg-Marquardt, adaptada a problemas não-lineares, e uma rede *feedforward* com retropropagação do erro com duas camadas, critérios base e pré-definidos pela ferramenta *nntool* do *Matlab*. Em cada uma das simulações, foram avaliados outros parâmetros disponíveis na ferramenta e que não constituem a sua base pré-definida. Importa ainda acrescentar que, por tal não ter sido feito anteriormente, a distinção entre uma rede *feedforward* simples e uma rede *feedforward* com retropropagação é feita através da utilização do erro de saída para introduzir, em sentido contrário ao funcionamento normal de rede, um critério para o ajuste dos pesos em função desse mesmo erro. Este algoritmo permite a determinação de pesos cada vez mais ajustados e, conseqüentemente, uma convergência mais rápida.

A análise de sensibilidade dos parâmetros foi iniciada pela determinação do número óptimo de neurónios e foi realizada de acordo com a metodologia descrita no Ponto 1 dos Anexos. Com este estudo fixou-se o número óptimo de neurónios (cinco) para a avaliação dos restantes parâmetros e decidiu-se pela utilização da metodologia de Fletcher e Goss (1993) na determinação do intervalo óptimo do número de neurónios, através dos limites máximo e mínimo, para os modelos de RNA a construir e que consiste na utilização das seguintes equações:

$$(2n^{1/2} + m) \quad (13)$$

$$(2n + 1) \quad (14)$$

Em que:

$n$ , é o número de nós ou variáveis de entrada;

$m$ , é o número de variáveis de saída.

Os restantes parâmetros que importa definir na construção de uma RNA através do Matlab foram determinados pela metodologia iterativa descrita no Ponto 1 dos anexos, tendo sido seleccionados o método do Gradiente com Momento (LEARNGDM) como função de aprendizagem, a tangente hiperbólica (TANSIG) como função de activação e os mínimos quadrados como método de avaliação do erro.

### 3.2.3 Transformação de séries de valores

De acordo com Shi (2000), o principal objectivo da transformação de dados é a modificação da distribuição das variáveis de entrada para que consigam aproximar-se melhor aos dados de saída, sugerindo mesmo que o desempenho de uma RNA pode, muitas vezes, ser melhorado por esta operação. Cumulativamente ao objectivo inicial de aproximação entre entradas e saídas do algoritmo, esta operação permite ainda

adequar os dados de entrada e saída ao domínio das funções de transferência a utilizar. A transformação de dados, segundo este autor, pode ser conseguida através de três formas distintas: a Transformação Linear, a Normalização Estatística e Funções Matemáticas.

No presente trabalho abordou-se, exclusivamente, a Transformação linear por ser, não só a mais simples, mas também porque é a mais amplamente difundida, de acordo com a bibliografia pesquisada. Esta abordagem é executada através da alteração da escala dos dados de entrada e saída, aproximando-os o mais possível e adequando-os ao domínio da Função de Transferência seleccionada para a RNA. As séries de entrada e saída são transformadas independentemente e o seu domínio final é, normalmente, [0,1] ou [-1,1]. O procedimento adoptado foi seleccionar o domínio das séries de dados de acordo com o domínio da Função de transferência utilizada. Neste conjunto de operações iniciais, como a Função de Transferência utilizada foi a Tangente Hiperbólica, converteu-se os dados para o domínio [-1,1]. Noutras RNA criadas mais à frente neste trabalho foi sempre utilizada esta transformação porque, para além da Função de Transferência Tangente Hiperbólica, apenas se utilizou a Função Linear com domínio  $[-\infty, \infty]$ , na ferramenta *nftool*, para a qual também se adequa a série no domínio [-1,1]. Foi utilizada a seguinte fórmula de transformação:

$$X_{(i)}^T = -1 + \left( \frac{2}{X_{\text{máx}} - X_{\text{mín}}} \right) \times (X_i - X_{\text{mín}}) \quad (14)$$

Em que:

$X_{(i)}^T$  - Valor transformado

$X_{(i)}$  - Valor registado

$X_{\text{máx}}$  - Máximo da série

$X_{\text{mín}}$  - Mínimo da série

### 3.2.3 Modelos Desenvolvidos

Após a avaliação dos diferentes parâmetros do modelo de RNA a aplicar, pode-se definir a base genérica da rede como sendo do tipo *feedforward* com retropropagação do erro e com duas camadas. O algoritmo de treino é o de Levenberg-Marquardt (TRAINLM), utilizado por defeito no Matlab, e o método do Gradiente com Momento (LEARNNGDM) como função de aprendizagem. A função de activação será a tangente hiperbólica (TANSIG) e terá como método de avaliação do erro, o qual servirá para parar o algoritmo, os mínimos quadrados. O número de neurónios será avaliado, em cada caso, de acordo com o intervalo de valores definidos pelas equações 13 e 14. Utilizou-se a *nftool* para a criação da RNA e a ferramenta *nntool* para simular as RNA treinadas.

De acordo com os parâmetros da RNA definidos e que constituem a base de todos os modelos desenvolvidos (Figura 3.11), apresentam-se de seguida todos os modelos criados no presente trabalhos.

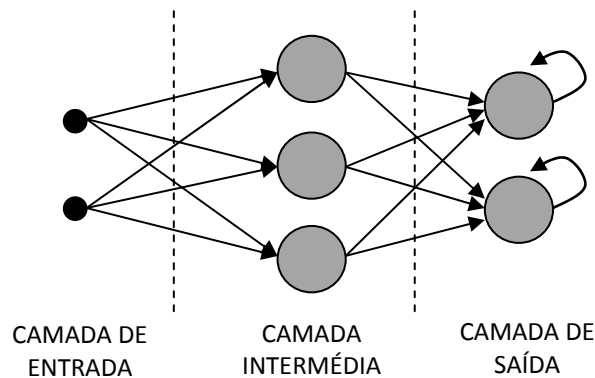


Figura 3.11 – Arquitectura base da RNA utilizada

### 3.2.3.1 Modelos de Regressão

Neste tipo de modelos pretende-se ajustar a rede à série de dados fornecida. São utilizados todos os valores da série e, após o treino, o desempenho da rede é avaliado através da comparação entre os valores simulados e os valores reais. A simulação é feita com a mesma série utilizada para o treino. O Quadro 3.9 resume os modelos de regressão criados.

Quadro 3.9 – Resumo dos modelos de regressão

RNA	Tipo	Descrição	Var. Entrada	Var. Saída	N.º Neurónios
RNA-HR1	Hidrodinâmica	Determinação do caudal através da precipitação em Barcelos	Precipitação em Barcelos	Caudal em Barcelos	1 a 12 com incremento de 1
RNA-HR2	Hidrodinâmica	Determinação do caudal através da precipitação e nível de água em Barcelos	Precipitação e nível de água em Barcelos	Caudal em Barcelos	2 a 7 com incremento de 1
RNA-HR3	Hidrodinâmica	Determinação do caudal através do nível de água em Barcelos	Nível de água em Barcelos	Caudal em Barcelos	3
RNA-HR4	Hidrodinâmica	Determinação do caudal em Barcelos através do caudal efluente na barragem da Caniçada	Caudal efluente na barragem da Caniçada	Caudal em Barcelos	1 a 10 com incremento de 1
RNA-HR5	Hidrodinâmica	Determinação do caudal através da precipitação em Barcelos e do caudal efluente na barragem da Caniçada	Precipitação em Barcelos e caudal efluente na barragem da Caniçada	Caudal em Barcelos	3 a 6 com incremento de 1
RNA-HR6	Hidrodinâmica	Determinação do nível em Barcelos através do caudal efluente na barragem da Caniçada	Caudal efluente na barragem da Caniçada	Nível em Barcelos	3
RNA-QR1	Qualidade da água	Determinação da concentração de CBO5 em Barcelos através da concentração da mesma variável na Caniçada	Conc. de CBO <sub>5</sub> na barragem da Caniçada	Conc. de CBO <sub>5</sub> em Barcelos	2 a 5 com incremento de 1
RNA-QR2	Qualidade da água	Determinação da concentração de OD em Barcelos através da concentração da mesma variável na Caniçada	Conc. de OD na barragem da Caniçada	Conc. de OD em Barcelos	2 a 5 com incremento de 1
RNA-QR3	Qualidade da água	Determinação das concentrações de Coliformes Totais em Barcelos através da concentração da mesma variável na Caniçada	Conc. de CT na barragem da Caniçada	Conc. de CT em Barcelos	2 a 5 com incremento de 1
RNA-QR4	Qualidade da água	Determinação das concentrações de Coliformes Fecais em Barcelos através da concentração da mesma variável na Caniçada	Conc. de CF na barragem da Caniçada	Conc. de CF em Barcelos	2 a 6 com incremento de 1
RNA-QR5	Qualidade da água	Determinação das concentrações de Streptococos Fecais em Barcelos através da concentração da mesma variável na Caniçada	Conc. de EF na barragem da Caniçada	Conc. de EF em Barcelos	2 a 5 com incremento de 1
RNA-QR6	Qualidade da água	Determinação da concentração de OD em Barcelos através da concentração da CBO5 na mesma estação	Conc. de CBO <sub>5</sub> em Barcelos	Conc. de OD em Barcelos	2 a 6 com incremento de 1

Quadro 3.9 – Resumo dos modelos de regressão (continuação)

RNA	Tipo	Descrição	Var. Entrada	Var. Saída	N.º Neurónios
RNA-QR7	Qualidade da água	Determinação da concentração de CBO5 em Barcelos através da concentração da mesma variável na Caniçada e em Ponte Porto	Conc. de CBO <sub>5</sub> na barragem da Caniçada e Ponte Porto	Conc. de CBO <sub>5</sub> em Barcelos	3 a 7 com incremento de 1
RNA-QR8	Qualidade da água	Determinação da concentração de OD em Barcelos através da concentração da mesma variável na Caniçada e em Ponte Porto	Conc. de OD na barragem da Caniçada e Ponte Porto	Conc. de OD em Barcelos	3 a 5 com incremento de 1
RNA-QR9	Qualidade da água	Determinação das concentrações de Coliformes Totais em Barcelos através da concentração da mesma variável na Caniçada e em Ponte Porto	Conc. de CT na barragem da Caniçada e Ponte Porto	Conc. de CT em Barcelos	3 a 6 com incremento de 1
RNA-QR10	Qualidade da água	Determinação das concentrações de Coliformes Fecais em Barcelos através da concentração da mesma variável na Caniçada e em Ponte Porto	Conc. de CF na barragem da Caniçada e Ponte Porto	Conc. de CF em Barcelos	3 a 6 com incremento de 1
RNA-QR11	Qualidade da água	Determinação das concentrações de Streptococos Fecais em Barcelos através da concentração da mesma variável na Caniçada e em Ponte Porto	Conc. de EF na barragem da Caniçada e Ponte Porto	Conc. de EF em Barcelos	3 a 6 com incremento de 1

### 3.2.3.2 Modelos de Previsão

Uma das possibilidades de utilização da RNA é a previsão de uma variável com base em registos de variáveis dependentes conhecidas. Como em todas as RNA apresentadas no presente trabalho, a construção de uma rede para efeitos de previsão pressupõe conhecimento prévio das variáveis para que seja possível o seu treino, no entanto, o que distingue uma RNA de previsão das restantes é a utilização de dados de entrada, durante a simulação, para os quais a rede não foi especificamente treinada. É uma ferramenta útil, por exemplo, no preenchimento de registos incompletos em períodos conhecidos.

Neste ponto, as RNA foram treinadas com a primeira metade, por ordem cronológica, dos valores disponíveis, sendo a segunda metade utilizada para as simulações e avaliação do desempenho. O Quadro 3.10 resume os modelos de regressão criados.

Quadro 3.10 – Resumo dos modelos de previsão

<b>RNA</b>	<b>Tipo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Var. Entrada</b>	<b>Var. Saída</b>	<b>N.º Neurónios</b>
RNA-HP1	Hidrodinâmica	Previsão do caudal em Barcelos utilizando o nível no mesmo local	Precipitação em Barcelos	Caudal em Barcelos	3
RNA-HP1.1	Hidrodinâmica	Previsão do Caudal em Padim da Graça, utilizando o nível no mesmo local e a RNA-HP1	Nível em Padim da Graça	Caudal em Padim da Graça	3
RNA-HP2	Hidrodinâmica	Previsão do caudal em Barcelos utilizando o caudal efluente na barragem da Caniçada	Caudal efluente na barragem da Caniçada	Caudal em Barcelos	6
RNA-HP3	Hidrodinâmica	Previsão do nível de água em Barcelos utilizando o caudal efluente na barragem da Caniçada	Caudal efluente na barragem da Caniçada	Nível de água em Barcelos	3
RNA-QP1	Qualidade da água	Previsão da concentração de CBO <sub>5</sub> em Barcelos através da concentração de CBO <sub>5</sub> na Caniçada	Conc. de CBO <sub>5</sub> na barragem da Caniçada	Conc. de CBO <sub>5</sub> em Barcelos	3
RNA-QP2	Qualidade da água	Previsão da concentração de OD em Barcelos através da concentração de OD na Caniçada	Conc. de OD na barragem da Caniçada	Conc. de OD em Barcelos	5
RNA-QP3	Qualidade da água	Previsão da concentração de CT em Barcelos através da concentração de CT na Caniçada	Conc. de CT na barragem da Caniçada	Conc. de CT em Barcelos	4
RNA-QP4	Qualidade da água	Previsão da concentração de CF em Barcelos através da concentração de CF na Caniçada	Conc. de CF na barragem da Caniçada	Conc. de CF em Barcelos	5
RNA-QP5	Qualidade da água	Previsão da concentração de EF em Barcelos através da concentração de EF na Caniçada	Conc. de EF na barragem da Caniçada	Conc. de EF em Barcelos	4
RNA-QP6	Qualidade da água	Previsão da concentração de OD em Barcelos através da concentração de CBO <sub>5</sub> no mesmo local	Conc. de CBO <sub>5</sub> em Barcelos	Conc. de OD em Barcelos	6
RNA-QP7	Qualidade da água	Previsão da concentração de CBO <sub>5</sub> em Barcelos através da concentração de CBO <sub>5</sub> na Caniçada e em Ponte Porto	Conc. de CBO <sub>5</sub> na barragem da Caniçada e em Ponte Porto	Conc. de CBO <sub>5</sub> em Barcelos	3
RNA-QP8	Qualidade da água	Previsão da concentração de OD em Barcelos através da concentração de OD na Caniçada e em Ponte Porto	Conc. de OD na barragem da Caniçada e em Ponte Porto	Conc. de OD em Barcelos	5
RNA-QP9	Qualidade da água	Previsão da concentração de CT em Barcelos através da concentração de CT na Caniçada e em Ponte Porto	Conc. de CT na barragem da Caniçada e em Ponte Porto	Conc. de CT em Barcelos	4
RNA-QP10	Qualidade da água	Previsão da concentração de CF em Barcelos através da concentração de CF na Caniçada e em Ponte Porto	Conc. de CF na barragem da Caniçada e em Ponte Porto	Conc. de CF em Barcelos	5

Quadro 3.10 – Resumo dos modelos de previsão (continuação)

RNA	Tipo	Descrição	Var. Entrada	Var. Saída	N.º Neurónios
RNA-QP11	Qualidade da água	Previsão da concentração de EF em Barcelos através da concentração de EF na Caniçada e em Ponte Porto	Conc. de EF na barragem da Caniçada e em Ponte Porto	Conc. de EF em Barcelos	4

### 3.2.3.3 Modelos Emuladores

Nestas RNA os dados de entrada e os dados de saída utilizados para o treino e consequente ajuste dos pesos serão as fronteiras do modelo e os resultados das simulações do SOBEK. O Quadro 3.11 resume os modelos emuladores criados.

Quadro 3.11 – Resumo dos modelos emuladores

RNA	Tipo	Descrição	Var. Entrada	Var. Saída	N.º Neurónios
RNA-HE1	Hidrodinâmica	Determinação do caudal de cálculo em Barcelos utilizando o caudal efluente na Caniçada	Caudal na Caniçada	Caudal em Barcelos	3
RNA-HE2	Hidrodinâmica	Determinação do nível de água de cálculo em Barcelos utilizando o caudal efluente na Caniçada	Caudal na Caniçada	Nível de água em Barcelos	3
RNA-HE3	Hidrodinâmica	Determinação do nível de água de cálculo em Barcelos utilizando o caudal de cálculo no mesmo local	Caudal em Barcelos	Nível de água em Barcelos	3
RNA-QE1.1 (Cenário 1)	Qualidade da água	Determinação da conc. de CBO <sub>5</sub> em Barc. através da conc. de CBO <sub>5</sub> na Caniçada	Conc. de CBO <sub>5</sub> na Caniçada	Conc. de CBO <sub>5</sub> em Barcelos	3
RNA-QE2.1 (Cenário 1)	Qualidade da água	Determinação da conc. de CBO <sub>5</sub> em Barc. através da conc. de CBO <sub>5</sub> e caudal na Caniçada	Conc. de CBO <sub>5</sub> e caudal na Caniçada	Conc. de CBO <sub>5</sub> em Barcelos	5
RNA-QE3.1 (Cenário 1)	Qualidade da água	Determinação da conc. de CBO <sub>5</sub> em Barc. através da conc. de CBO <sub>5</sub> e caudal na Caniçada e conc. de CBO <sub>5</sub> na descarga da ETAR de Frossos	Conc. de CBO <sub>5</sub> na Caniçada e Frossos; caudal na Caniçada	Conc. de CBO <sub>5</sub> em Barcelos	6
RNA-QE4.1 (Cenário 1)	Qualidade da água	Determinação da conc. de CBO <sub>5</sub> em Barc. através da conc. de CBO <sub>5</sub> e caudal na Caniçada e conc. de CBO <sub>5</sub> nas descargas das quatro ETAR com maior conc. do modelo	Conc. de CBO <sub>5</sub> na Caniçada e nas ETAR; caudal na Caniçada	Conc. de CBO <sub>5</sub> em Barcelos	8
RNA-QE5.1 (Cenário 1)	Qualidade da água	Determinação da conc. de OD em Barc. através da conc. de OD e caudal na Caniçada	Conc. de OD na Caniçada	Conc. de OD em Barcelos	5



Quadro 3.11 – Resumo dos modelos emuladores (continuação)

RNA	Tipo	Descrição	Var. Entrada	Var. Saída	N.º Neurónios
RNA-QE6.1 (Cenário 1)	Qualidade da água	Determinação da conc. de OD em Barc. através da conc. de OD e caudal na Caniçada e conc. de OD na descarga da ETAR de Frossos	Conc. de OD na Caniçada e Frossos; caudal na Caniçada	Conc. de OD em Barcelos	6
RNA-QE7.1 (Cenário 1)	Qualidade da água	Determinação da conc. de OD em Barc. através da conc. de OD e caudal na Caniçada e conc. de OD nas descargas das quatro ETAR com maior conc. do modelo	Conc. de OD na Caniçada e nas ETAR; caudal na Caniçada	Conc. de OD em Barcelos	8
RNA-QE8.1 (Cenário 1)	Qualidade da água	Determinação da conc. de CT em Barc. através da conc. de CT e caudal na Caniçada	Conc. de CT na Caniçada	Conc. de CT em Barcelos	5
RNA-QE9.1 (Cenário 1)	Qualidade da água	Determinação da conc. de CT em Barc. através da conc. de CT e caudal na Caniçada e conc. de CT na descarga da ETAR de Frossos	Conc. de CT na Caniçada e Frossos; caudal na Caniçada	Conc. de CT em Barcelos	6
RNA-QE10.1 (Cenário 1)	Qualidade da água	Determinação da conc. de CT em Barc. através da conc. de CT e caudal na Caniçada e conc. de CT nas descargas das quatro ETAR com maior conc. do modelo	Conc. de CT na Caniçada e nas ETAR; caudal na Caniçada	Conc. de CT em Barcelos	8
RNA-QE11.1 (Cenário 1)	Qualidade da água	Determinação da conc. de CF em Barc. através da conc. de CF e caudal na Caniçada	Conc. de CF na Caniçada	Conc. de CF em Barcelos	5
RNA-QE12.1 (Cenário 1)	Qualidade da água	Determinação da conc. de CF em Barc. através da conc. de CF e caudal na Caniçada e conc. de CF na descarga da ETAR de Frossos	Conc. de CF na Caniçada e Frossos; caudal na Caniçada	Conc. de CF em Barcelos	6
RNA-QE13.1 (Cenário 1)	Qualidade da água	Determinação da conc. de CF em Barc. através da conc. de CF e caudal na Caniçada e conc. de CF nas descargas das quatro ETAR com maior conc. do modelo	Conc. de CF na Caniçada e nas ETAR; caudal na Caniçada	Conc. de CF em Barcelos	8
RNA-QE14.1 (Cenário 1)	Qualidade da água	Determinação da conc. de EF em Barc. através da conc. de EF e caudal na Caniçada	Conc. de EF na Caniçada	Conc. de EF em Barcelos	5
RNA-QE15.1 (Cenário 1)	Qualidade da água	Determinação da conc. de EF em Barc. através da conc. de EF e caudal na Caniçada e conc. de EF na descarga da ETAR de Frossos	Conc. de EF na Caniçada e Frossos; caudal na Caniçada	Conc. de EF em Barcelos	6
RNA-QE16.1 (Cenário 1)	Qualidade da água	Determinação da conc. de EF em Barc. através da conc. de EF e caudal na Caniçada e conc. de EF nas descargas das quatro ETAR com maior conc. do modelo	Conc. de EF na Caniçada e nas ETAR; caudal na Caniçada	Conc. de EF em Barcelos	8
RNA-QE17.1 (Cenário 1)	Qualidade da água	Determinação da conc. de OD em Barc. através da conc. de CBO <sub>5</sub> no mesmo local	Conc. de CBO <sub>5</sub> em Barcelos	Conc. de OD em Barcelos	3

Quadro 3.11 – Resumo dos modelos emuladores (continuação)

<b>RNA</b>	<b>Tipo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Var. Entrada</b>	<b>Var. Saída</b>	<b>N.º Neurónios</b>
RNA-QE18.1 (Cenário 1)	Qualidade da água	Determinação da conc. de CBO <sub>5</sub> em Barc. através da conc. de OD no mesmo local	Conc. de OD em Barcelos	Conc. de CBO <sub>5</sub> em Barcelos	3
RNA-QE1.2 (Cenário 2)	Qualidade da água	Determinação da conc. de CBO <sub>5</sub> em Barc. através da conc. de CBO <sub>5</sub> na Caniçada (com descarga sem tratamento em Frossos)	Conc. de CBO <sub>5</sub> na Caniçada	Conc. de CBO <sub>5</sub> em Barcelos	3
RNA-QE2.2 (Cenário 2)	Qualidade da água	Determinação da conc. de CBO <sub>5</sub> em Barc. através da conc. de CBO <sub>5</sub> e caudal na Caniçada (com descarga sem tratamento em Frossos)	Conc. de CBO <sub>5</sub> e caudal na Caniçada	Conc. de CBO <sub>5</sub> em Barcelos	5
RNA-QE3.2 (Cenário 2)	Qualidade da água	Determinação da conc. de CBO <sub>5</sub> em Barc. através da conc. de CBO <sub>5</sub> e caudal na Caniçada e conc. de CBO <sub>5</sub> na descarga da ETAR de Frossos (com descarga sem tratamento em Frossos)	Conc. de CBO <sub>5</sub> na Caniçada e caudal na Caniçada	Conc. de CBO <sub>5</sub> em Barcelos	6
RNA-QE4.2 (Cenário 2)	Qualidade da água	Determinação da conc. de CBO <sub>5</sub> em Barc. através da conc. de CBO <sub>5</sub> e caudal na Caniçada e conc. de CBO <sub>5</sub> nas descargas das quatro ETAR com maior conc. do modelo (com descarga sem tratamento em Frossos)	Conc. de CBO <sub>5</sub> na Caniçada e nas ETAR; caudal na Caniçada	Conc. de CBO <sub>5</sub> em Barcelos	8
RNA-QE5.2 (Cenário 2)	Qualidade da água	Determinação da conc. de OD em Barc. através da conc. de OD e caudal na Caniçada (com descarga sem tratamento em Frossos)	Conc. de OD na Caniçada	Conc. de OD em Barcelos	5
RNA-QE6.2 (Cenário 2)	Qualidade da água	Determinação da conc. de OD em Barc. através da conc. de OD e caudal na Caniçada e conc. de OD na descarga da ETAR de Frossos (com descarga sem tratamento em Frossos)	Conc. de OD na Caniçada e caudal na Caniçada	Conc. de OD em Barcelos	6
RNA-QE7.2 (Cenário 2)	Qualidade da água	Determinação da conc. de OD em Barc. através da conc. de OD e caudal na Caniçada e conc. de OD nas descargas das quatro ETAR com maior conc. do modelo (com descarga sem tratamento em Frossos)	Conc. de OD na Caniçada e nas ETAR; caudal na Caniçada	Conc. de OD em Barcelos	8
RNA-QE8.2 (Cenário 2)	Qualidade da água	Determinação da conc. de CT em Barc. através da conc. de CT e caudal na Caniçada (com descarga sem tratamento em Frossos)	Conc. de CT na Caniçada	Conc. de CT em Barcelos	5
RNA-QE9.2 (Cenário 2)	Qualidade da água	Determinação da conc. de CT em Barc. através da conc. de CT e caudal na Caniçada e conc. de CT na descarga da ETAR de Frossos (com descarga sem tratamento em Frossos)	Conc. de CT na Caniçada e caudal na Caniçada	Conc. de CT em Barcelos	6

Quadro 3.11 – Resumo dos modelos emuladores (continuação)

RNA	Tipo	Descrição	Var. Entrada	Var. Saída	N.º Neurónios
RNA-QE10.2 (Cenário 2)	Qualidade da água	Determinação da conc. de CT em Barc. através da conc. de CT e caudal na Caniçada e conc. de CT nas descargas das quatro ETAR com maior conc. do modelo	Conc. de CT na Caniçada e nas ETAR; caudal na Caniçada	Conc. de CT em Barcelos	8
RNA-QE11.2 (Cenário 2)	Qualidade da água	Determinação da conc. de CF em Barc. através da conc. de CF e caudal na Caniçada (com descarga sem tratamento em Frossos)	Conc. de CF na Caniçada	Conc. de CF em Barcelos	5
RNA-QE12.2 (Cenário 2)	Qualidade da água	Determinação da conc. de CF em Barc. através da conc. de CF e caudal na Caniçada e conc. de CF na descarga da ETAR de Frossos (com descarga sem tratamento em Frossos)	Conc. de CF na Caniçada e Frossos; caudal na Caniçada	Conc. de CF em Barcelos	6
RNA-QE13.2 (Cenário 2)	Qualidade da água	Determinação da conc. de CF em Barc. através da conc. de CF e caudal na Caniçada e conc. de CF nas descargas das quatro ETAR com maior conc. do modelo (com descarga sem tratamento em Frossos)	Conc. de CF na Caniçada e nas ETAR; caudal na Caniçada	Conc. de CF em Barcelos	8
RNA-QE14.2 (Cenário 2)	Qualidade da água	Determinação da conc. de EF em Barc. através da conc. de EF e caudal na Caniçada (com descarga sem tratamento em Frossos)	Conc. de EF na Caniçada	Conc. de EF em Barcelos	5
RNA-QE15.2 (Cenário 2)	Qualidade da água	Determinação da conc. de EF em Barc. através da conc. de EF e caudal na Caniçada e conc. de EF na descarga da ETAR de Frossos (com descarga sem tratamento em Frossos)	Conc. de EF na Caniçada e Frossos; caudal na Caniçada	Conc. de EF em Barcelos	6
RNA-QE16.2 (Cenário 2)	Qualidade da água	Determinação da conc. de EF em Barc. através da conc. de EF e caudal na Caniçada e conc. de EF nas descargas das quatro ETAR com maior conc. do modelo (com descarga sem tratamento em Frossos)	Conc. de EF na Caniçada e nas ETAR; caudal na Caniçada	Conc. de EF em Barcelos	8
RNA-QE17.2 (Cenário 2)	Qualidade da água	Determinação da conc. de OD em Barc. através da conc. de CBO <sub>5</sub> no mesmo local (com descarga sem tratamento em Frossos)	Conc. de CBO <sub>5</sub> em Barcelos	Conc. de OD em Barcelos	3
RNA-QE18.2 (Cenário 2)	Qualidade da água	Determinação da conc. de CBO <sub>5</sub> em Barc. através da conc. de OD no mesmo local (com descarga sem tratamento em Frossos)	Conc. de OD em Barcelos	Conc. de CBO <sub>5</sub> em Barcelos	3

## CAPÍTULO

# 4 RESULTADOS

*Aquilo que foi e que será, e até mesmo aquilo que é, não somos capazes de saber, mas quanto àquilo que devemos fazer, não apenas somos capazes de saber, como também o sabemos sempre, e somente isso nos é necessário.*

Tolstoi, Léon

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos modelos RNA apresentados no capítulo anterior, agrupados por tipos de modelos.

### 4.1 HIDRODINÂMICA

De acordo com a informação apresentada anteriormente, foram utilizados modelos de RNA para regressão, para previsão e para a emulação de resultados de modelos SOBEK, com o objectivo de avaliar a sua aplicação em problemas de hidrodinâmica.

#### 4.1.1 Regressão

Na criação de RNA com dados de monitorização relativos à quantidade de água no rio Cávado e, mais especificamente, no trechos seleccionado, foram utilizadas essencialmente as variáveis de caudal, de precipitação e de nível.

##### 4.1.1.1 Determinação do caudal através da precipitação em Barcelos

A primeira RNA criada teve, como dados de entrada, a precipitação e como resultado o caudal. Os dados diários utilizados correspondem a uma série, descontínua, com registos desde o dia 2 de Fevereiro de 1998 até ao dia 20 de Julho de 1999, totalizando 130 registos. Embora o número de registos não seja significativo permite, no entanto, a utilização de informação compatível entre as diferentes estações e respectivas variáveis.

As Figuras 4.1 e 4.2 representam os valores registados de precipitação e caudal, respectivamente, no período indicado.

Das RNA construídas com diferentes números de neurónios, de acordo com o especificado, a rede com melhor desempenho, dez neurónios, apresentou um coeficiente de correlação de 0,37.

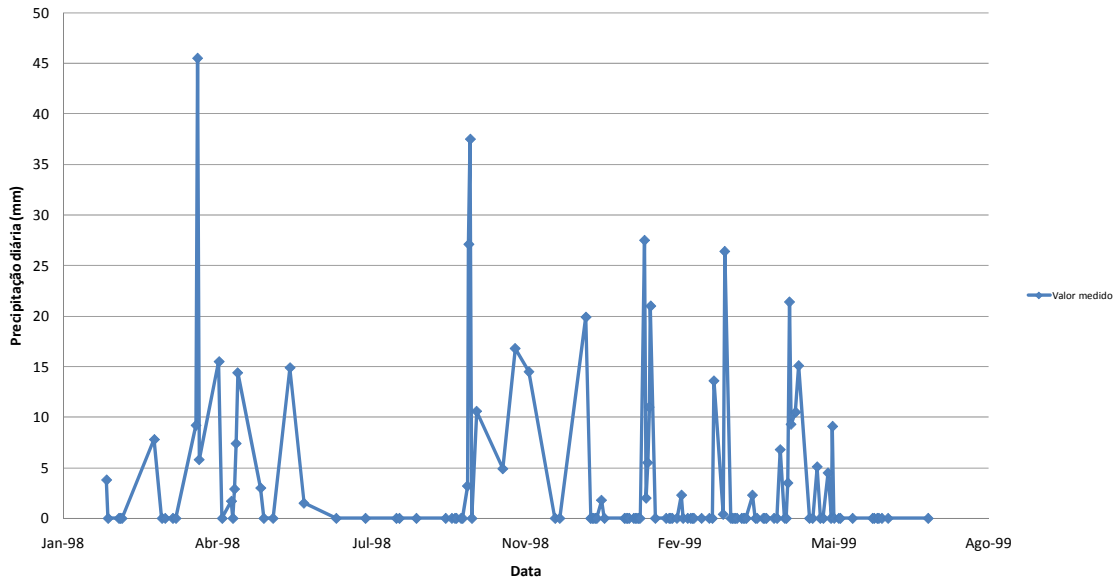


Figura 4.1 - Série de valores monitorizados de precipitação diária em Barcelos

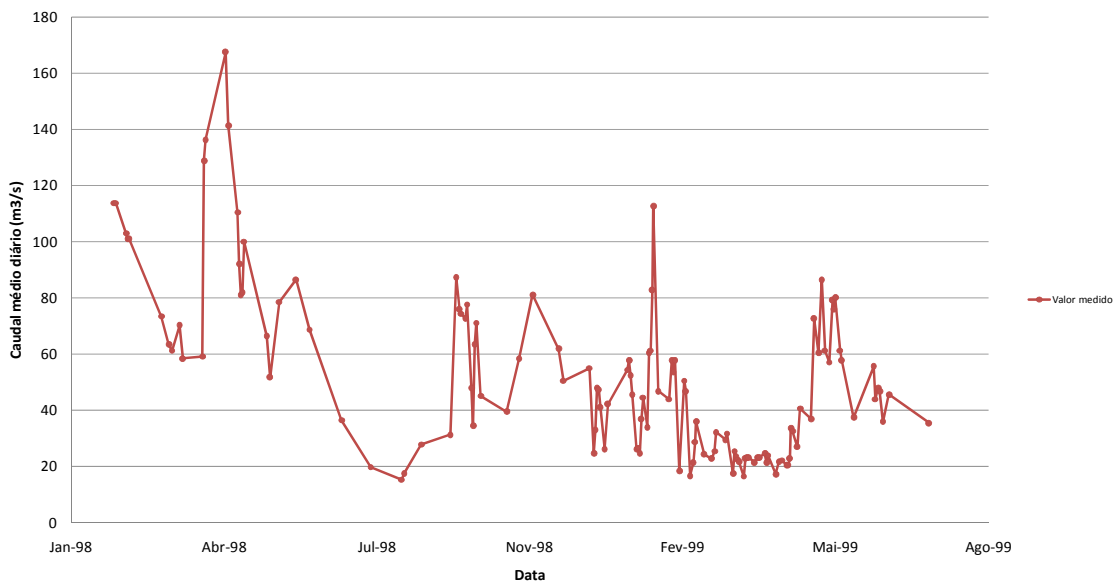


Figura 4.2 - Série de valores monitorizados de caudal médio diário em Barcelos

O gráfico da Figura 4.3 corrobora o coeficiente de correlação anterior, sendo possível verificar que os resultados não acompanham as flutuações verificadas nos registos de monitorização, sendo os limites inferior e superior dos resultados bem definidos e quase constantes ao longo de toda a simulação.

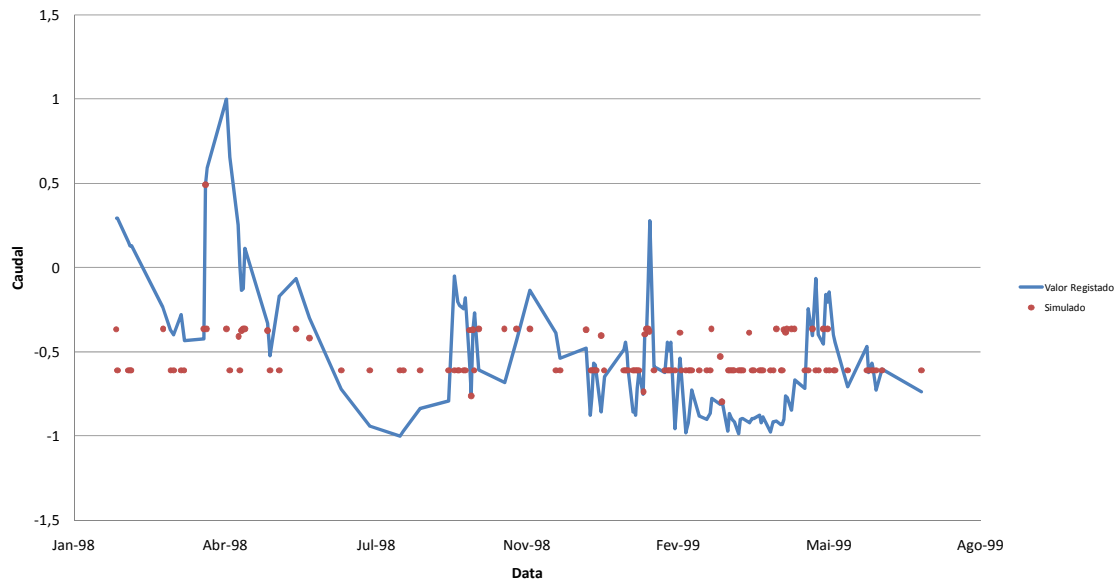


Figura 4.3 - Comparação entre valores monitorizados e simulados (transformados) para o caudal em Barcelos (Precipitação)

O resultado é um reflexo de uma relação reduzida entre os dados de entrada e os dados de saída, precipitação e caudal, respectivamente. Esta escassa influência da precipitação no caudal em Barcelos é traduzida pelo ajuste limitado da RNA aos dados fornecidos.

#### 4.1.1.2 Determinação do caudal através da precipitação e nível de água em Barcelos

Nesta RNA, comparativamente com a anterior, foi introduzida mais uma variável de entrada com o objectivo de melhorar a relação entre os dados de entrada e saída e, se possível, o resultado.

O intervalo do número de neurónios aconselhado para uma RNA com estas características varia entre três e cinco. Optou-se então pela variação do número de neurónios entre dois e sete, alargando ligeiramente o intervalo anterior, e com um incremento igual à unidade. Os valores de caudal e precipitação são iguais aos apresentados nas Figuras 4.1 e 4.2, tendo sido introduzido apenas, comparando com o ponto anterior, os registos de nível em Barcelos, apresentados na Figura 4.4.

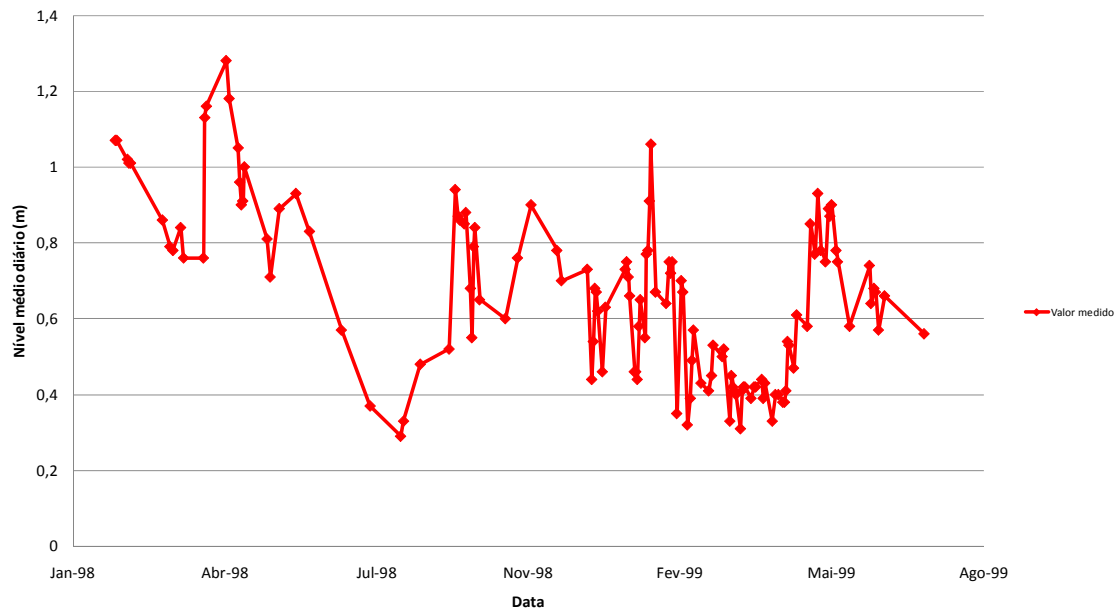


Figura 4.4 - Série de valores monitorizados de nível médio diário em Barcelos

Das RNA construídas com diferentes número de neurónios, de acordo com o especificado, a rede com melhor desempenho, quatro neurónios, apresentou um coeficiente de correlação de 1.

Este coeficiente de correlação indica que, tal como o gráfico da Figura 4.5 demonstra, que o ajuste dos resultados da RNA relativamente aos valores de monitorização é praticamente perfeito.

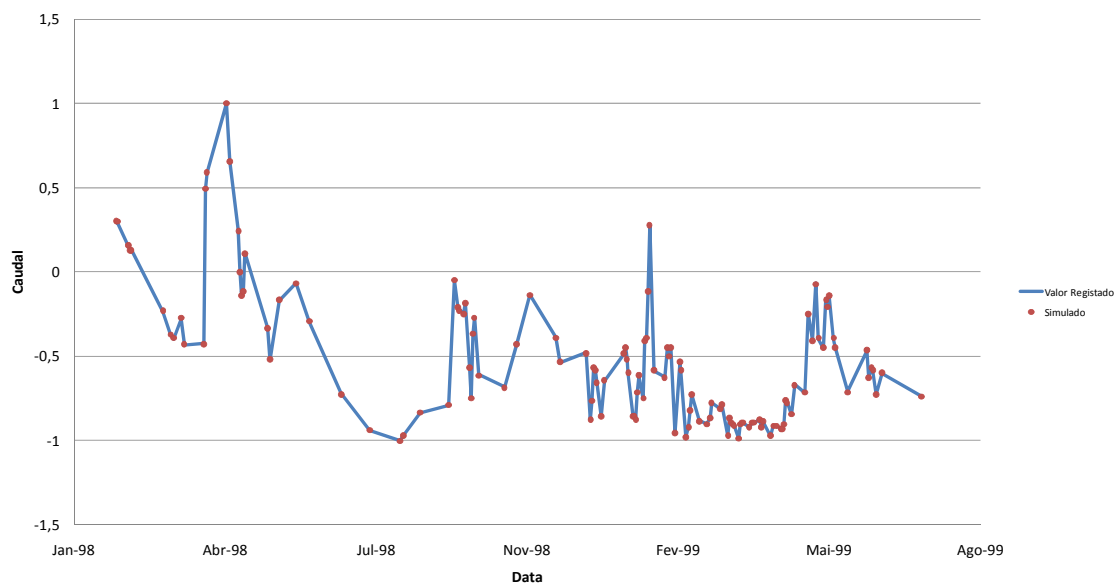


Figura 4.5 - Comparação entre valores monitorizados e simulados (transformados) para o caudal em Barcelos (Precipitação e Nível)



Ao introduzir o nível como dado de entrada à RNA criada anteriormente, pretendeu-se melhorar os seus resultados. Esse objectivo foi conseguido e resulta, principalmente, da relação existente entre os dados de monitorização do nível e do caudal. Normalmente apenas uma destas variáveis, o nível, é continuamente medida, sendo o caudal calculado de acordo com as curvas de vazão determinadas para o local. Como se trata de uma relação entre os dados, normalmente regressiva, a RNA conseguiu ajustar-se mais facilmente produzindo assim resultados praticamente iguais aos calculados através da curva de vazão.

Com este resultado, demonstrou-se que as RNA são ferramentas eficientes para a representação de curvas de vazão ou para a sua determinação.

#### 4.1.1.3 Determinação do caudal através do nível de água em Barcelos

Esta rede, baseada na rede apresentada no ponto anterior, servirá para confirmar se a precipitação tem ou não um peso significativo no resultado.

Uma vez que se trata de uma rede muito semelhante à anteriormente apresentada, foi decidida a utilização exclusiva de três neurónios, de acordo com o valor indicativo.

De acordo com os resultados obtidos até então, baixa correlação da precipitação com o caudal e ajuste quase perfeito da precipitação e nível com o caudal, o coeficiente de correlação do caudal com o nível manteve-se 1, tal como é possível observar na Figura 4.6, reforçando a justificação apresentada anteriormente para esta relação e confirmando a baixa influência no resultado anterior.

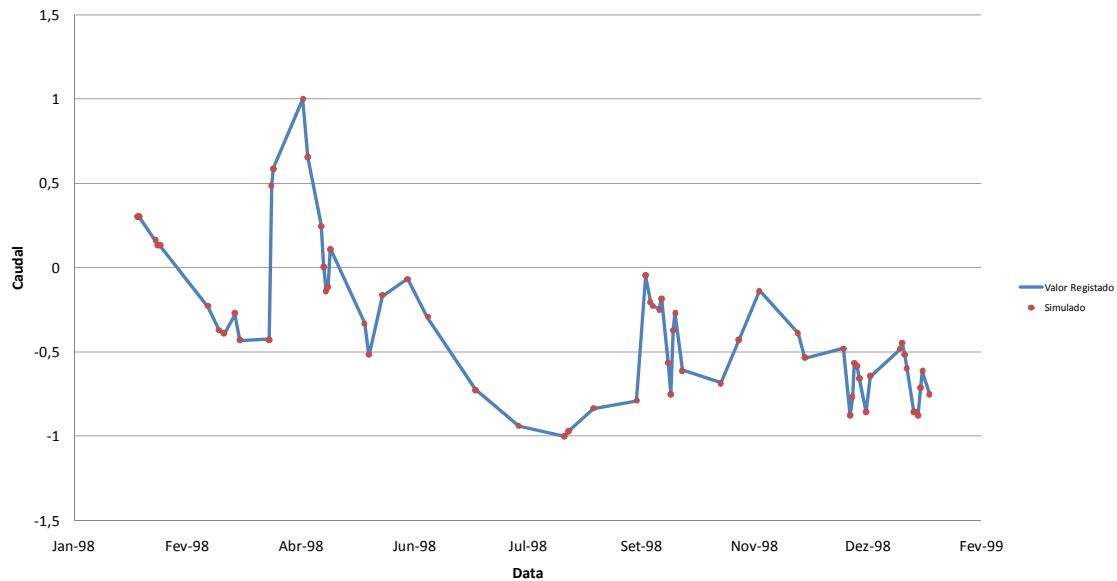


Figura 4.6 - Comparação entre valores monitorizados e simulados (transformados) para o caudal em Barcelos (Nível)

#### 4.1.1.4 Determinação do caudal em Barcelos através do caudal efluente na barragem da Caniçada

A barragem da Caniçada representa a última grande estrutura do rio Cávado, no seu trajecto até à respectiva foz, influenciando decisivamente o seu escoamento neste trecho.

Decidiu-se então criar uma RNA que permitisse simular o caudal do rio Cávado em Barcelos, tendo como dados de entrada o caudal efluente da Caniçada. Para esta rede, à semelhança da primeira, o número ideal de neurónios determinado pela fórmula é três. No entanto, foram construídas RNA com um número de neurónios desde um até dez, com um incremento de um.

A série de registos de entrada referentes ao caudal efluente na barragem da Caniçada encontra-se traduzida graficamente na Figura 4.7. O gráfico de registo de caudal em Barcelos foi apresentado na Figura 4.2.

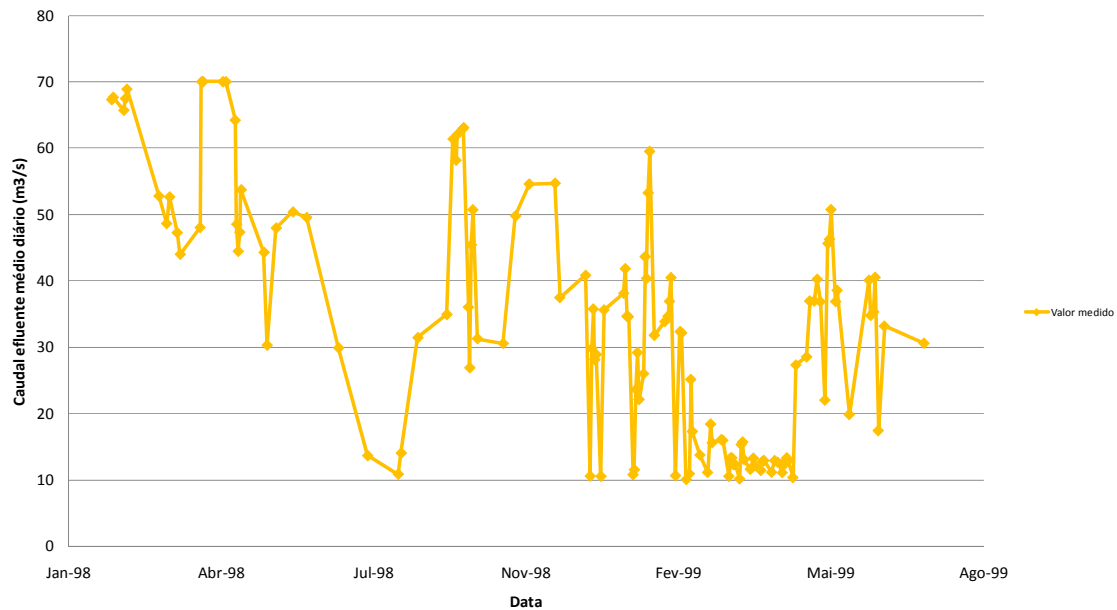


Figura 4.7 - Série de valores monitorizados de caudal efluente médio diário na barragem da Caniçada (Fevereiro de 1998 a Julho de 1999)

Das RNA construídas com diferentes número de neurónios, de acordo com o especificado, a rede com melhor desempenho, três neurónios, apresentou um coeficiente de correlação de 0,95.

A contrário da RNA anterior em que o elevado coeficiente de correlação era justificado pelo facto de uma das variáveis ter sido calculada em função da outra através de equações matemáticas, nesta rede o coeficiente próximo de um resulta da elevada influência que o caudal efluente da barragem da Caniçada exerce sobre os valores da monitorização em Barcelos. A Figura 4.8 apresenta os resultados da simulação da RNA.

Embora o ajuste, tal como se verifica, não seja perfeito, a rede consegue fornecer um valor aproximado para o caudal em Barcelos, sendo conhecido o efluente da Caniçada. Esta situação é útil em termos práticos porque permite avaliar os efeitos das descargas da referida barragem em Barcelos, fornecendo elementos preciosos de auxílio à decisão.

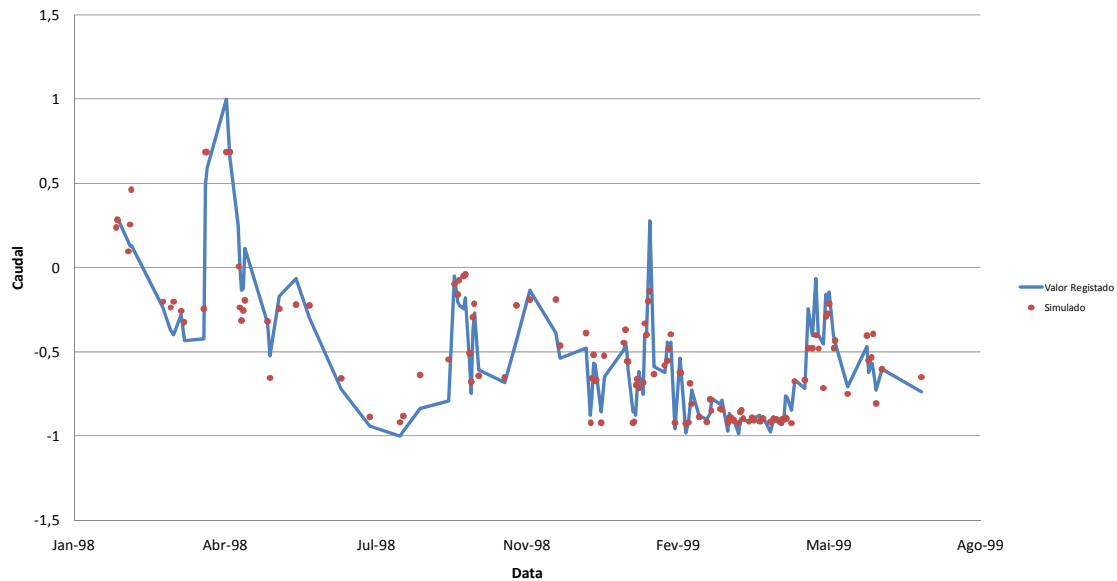


Figura 4.8 - Comparação entre valores monitorizados e simulados (transformados) para o caudal em Barcelos (Precipitação e Caudal efluente da Caniçada)

#### 4.1.1.5 Determinação do caudal através da precipitação em Barcelos e do caudal efluente na barragem da Caniçada

Esta RNA tem como principal objectivo tentar melhorar o resultado do ponto anterior através da introdução de uma nova variável de entrada, também ela com influência directa no escoamento do rio.

Para redes com estas características, o intervalo para o número de neurónios varia entre três e cinco, tendo sido criadas redes com um intervalo de valores de três a seis, com um incremento de um.

Os gráficos relativos aos registos associados a estas simulações podem ser encontrados nas Figuras 4.1 e 4.7.

Das RNA construídas com diferentes número de neurónios, de acordo com o especificado, a rede com melhor desempenho, seis neurónios, apresentou um coeficiente de correlação de 0,96.

Nesta simulação, cujos resultados se apresentam na Figura 4.9, pretendeu-se avaliar se a introdução da precipitação teria influência significativa na RNA anterior, mesmo

sabendo que, individualmente, a precipitação como variável de entrada não tinha produzido resultados significativos.

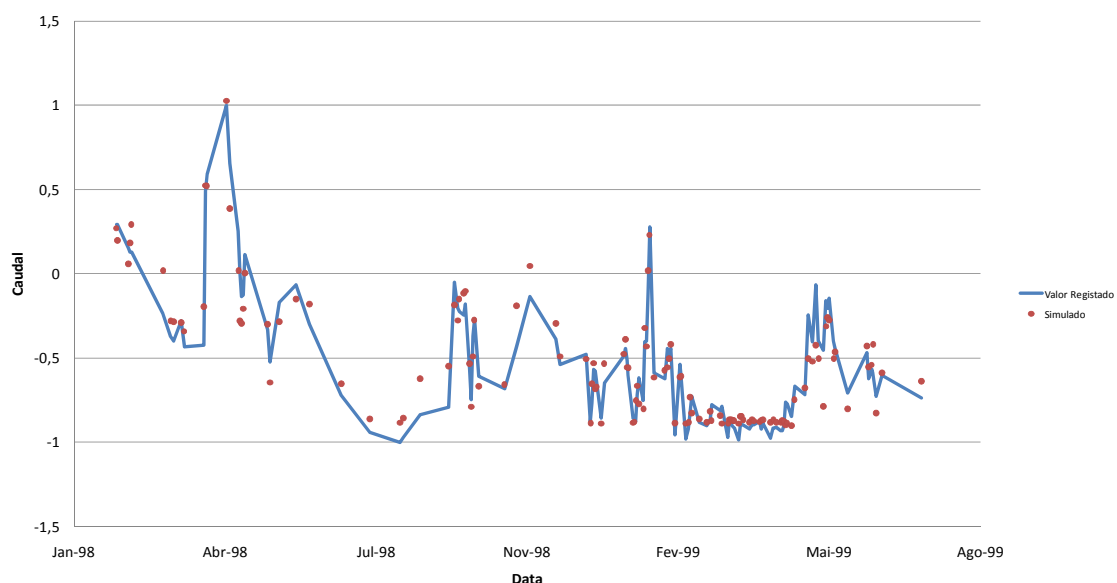


Figura 4.9 - Comparação entre valores monitorizados e simulados (transformados) para o caudal em Barcelos (Caudal efluente da Caniçada)

Verificou-se, tal como seria de esperar, que os resultados não diferiram muito dos anteriores, confirmando-se a reduzida influência da precipitação registada em Barcelos no caudal aí verificado.

#### 4.1.1.6 Determinação do nível em Barcelos através do caudal efluente na barragem da Caniçada

O nível de água num determinado rio varia de acordo com as alterações de caudal. Estas alterações têm causas associadas, algumas das quais já indicadas no presente trabalho, variando apenas o seu grau de influência no valor final do caudal. O nível é uma variável importante na tomada de decisão, principalmente em situações de cheia.

Como até ao momento apenas foram criadas RNA que tivessem como variável de saída o caudal, entendeu-se que a importância do nível enquanto variável caracterizadora do escoamento no local justificaria a criação de uma rede com essa variável de saída. Utilizou-se como dados de entrada o caudal efluente médio diário da Caniçada, num

período compreendido entre Fevereiro de 1998 a Julho de 1999. Foram utilizados três neurónios, de acordo com o valor indicativo para redes com este número de variáveis.

De acordo com os resultados apresentados na Figura 4.10, o valor do coeficiente de correlação associado a esta RNA é 0,95.

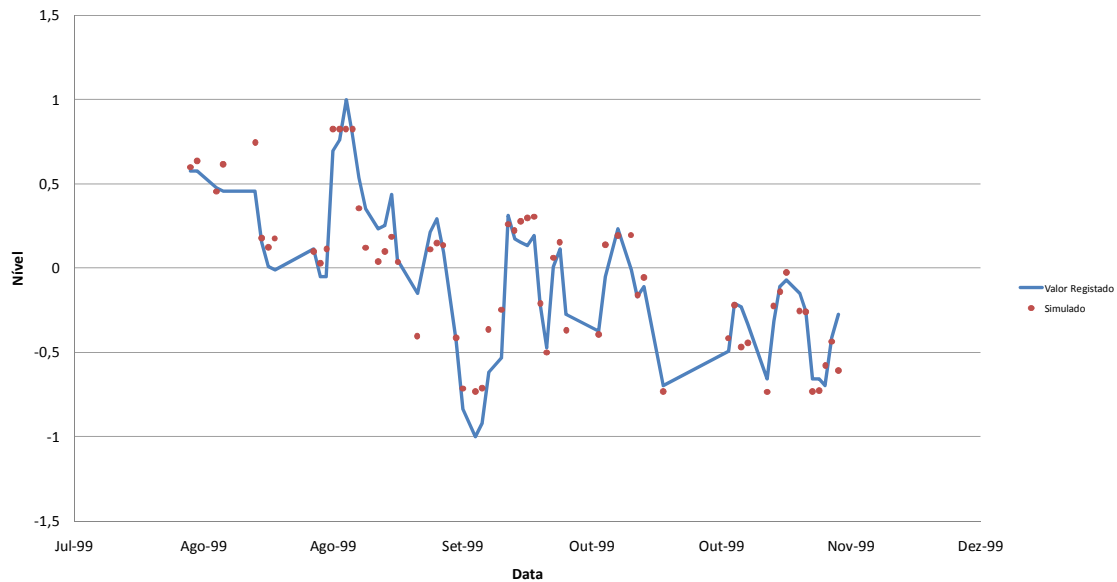


Figura 4.10 - Comparação entre valores monitorizados e simulados (transformados) para o nível em Barcelos (Caudal efluente da Caniçada)

Comparativamente com a rede correspondente que utiliza o caudal como variável de saída, a correlação é igual, sendo mais uma vez justificada pela relação existente entre estas duas variáveis através da curva de vazão.

A rede, pelos resultados apresentados, mostra-se adequada à obtenção de valores aproximados para o nível de água em Barcelos, tendo como base o caudal efluente da barragem da Caniçada.

#### 4.1.2 Previsão

Tal como já referido, as RNA foram treinadas com a primeira metade, por ordem cronológica, dos valores disponíveis, sendo a segunda metade utilizada para as simulações e avaliação do desempenho.

A avaliação dos resultados será feita através da comparação dos resultados da previsão com os resultados das simulações referentes ao treino das RNA correspondentes. Desta forma, criar-se-á uma base de desempenho para determinar se o treino foi ou não suficientemente abrangente ou, em alternativa, se os próprios resultados do treino foram superados.

O Quadro 4.1 contém o resumo dos coeficientes de correlação obtidos na fase de treino e na previsão correspondente.

Quadro 4.1 – Resumo comparativo dos coeficientes de correlação nas fases de treino e previsão

RNA	CORREL.(Treino)	CORREL.(Previsão)
RNA-HP1	1,00	0,98
RNA-HP1.1	1,00	0,93
RNA-HP2	0,95	0,90
RNA-HP3	0,95	0,93

As Figuras 4.11 a 4.14 representam os gráficos dos resultados obtidos na utilização das RNA criadas para previsão hidrodinâmica.

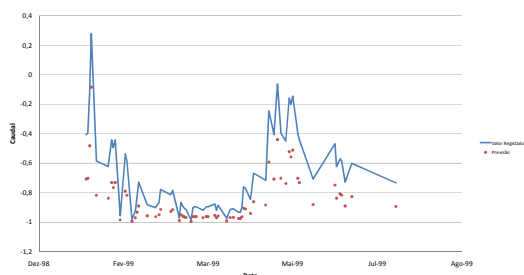


Figura 4.11 - Resultados da previsão RNA-HP1

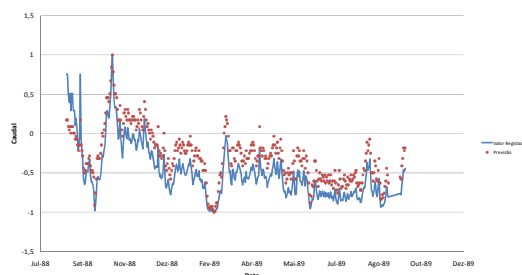


Figura 4.12 - Resultados da previsão RNA-HP1.1

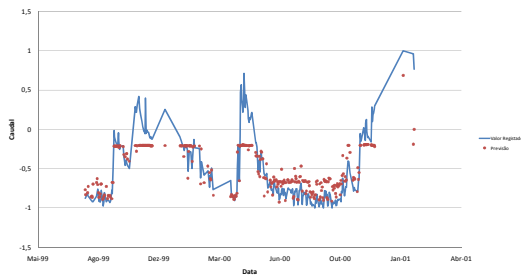


Figura 4.13 - Resultados da previsão RNA-HP2

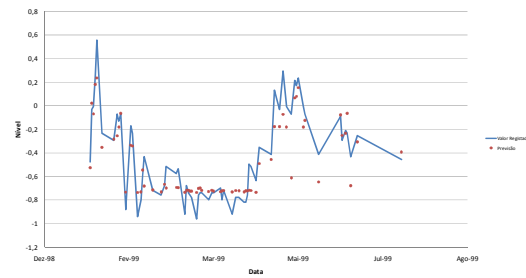


Figura 4.14 - Resultados da previsão RNA-HP3

Ao realizar simulações de previsão, será sempre de esperar que o coeficiente de correlação decresça relativamente aos resultados da fase de treino. Nas simulações de previsão que foram realizadas para a hidrodinâmica verificou-se uma diminuição marginal dos coeficientes de correlação, não afectando significativamente os resultados. Isto revela que, embora os registos disponíveis não fossem significativos, o treino foi suficientemente abrangente, permitindo extrapolar valores dentro do espectro para o qual a rede foi treinada. Esta situação poderá não se verificar em situações fora da gama de valores treinados (situações de cheia, p.ex).

Particularizando algumas simulações, a RNA-HP1, de acordo com as justificações fornecidas anteriormente, não se ajusta integralmente aos valores registados. Isto acontece porque, embora a relação da curva de vazão se mantenha para qualquer nível e caudal na secção em estudo, a RNA apenas foi treinada para uma gama específica de valores e, por não constituir uma fórmula rígida como na curva de vazão, não se adequa integralmente aos valores para os quais não foi treinada, ainda que os resultados tivessem sido satisfatórios.

Por outro lado, a RNA-HP1.1 apresenta um coeficiente de correlação de 0,93 para uma secção completamente diferente daquela para a qual foi treinada. Trata-se de um bom resultado e indica que a curva de vazão entre as duas secções não deverá ser muito distinta. Revela também que, embora não se possa fazer desta situação uma regra, será possível adequar mais facilmente uma RNA com estas características a uma determinada secção do que uma curva de vazão, apenas com um pequeno compromisso de precisão, igualmente assumido pelas curvas de vazão.



### 4.1.3 Emulação

Após a execução da simulação acima apresentada e a subsequente construção das RNA emuladoras do modelo SOBEK, comparou-se os resultados obtidos pelo SOBEK com os resultados das redes emuladoras (Figuras 4.15 a 4.17).

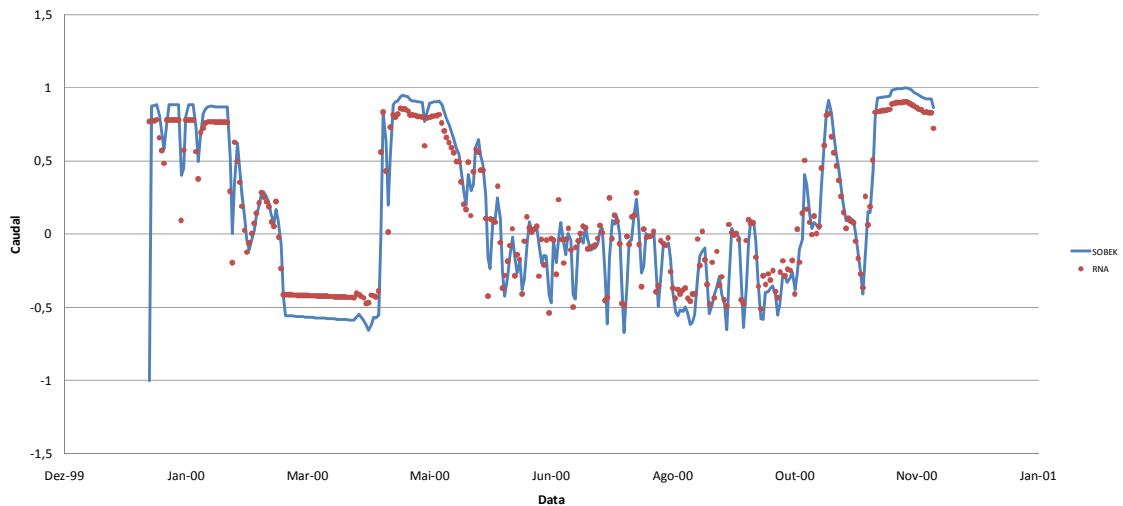


Figura 4.15 - Comparação entre os resultados do SOBEK e RNA (transformados) para o caudal (RNA-HE1)

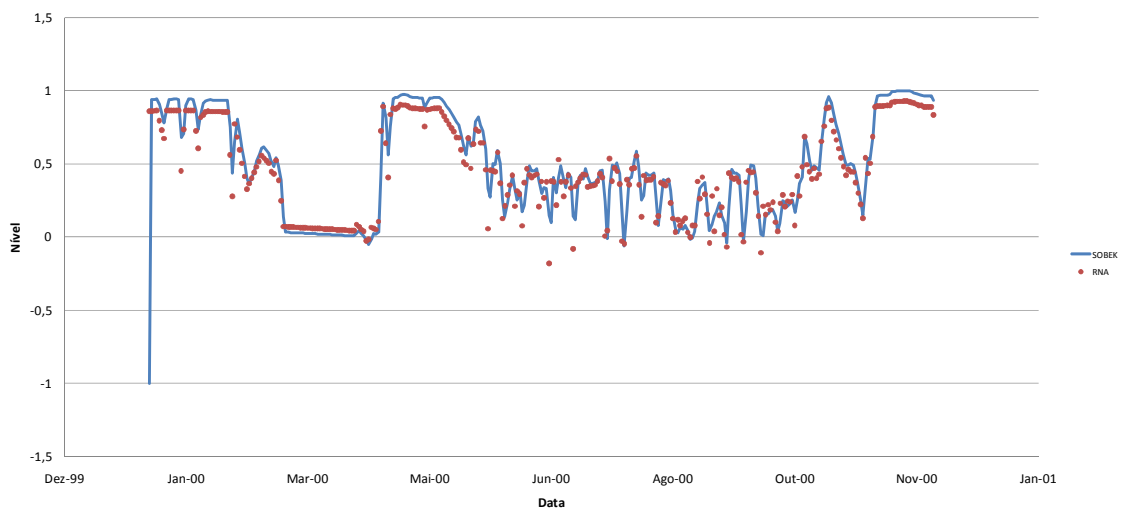


Figura 4.16 - Comparação entre os resultados do SOBEK e RNA (transformados) para o nível (RNA-HE2)

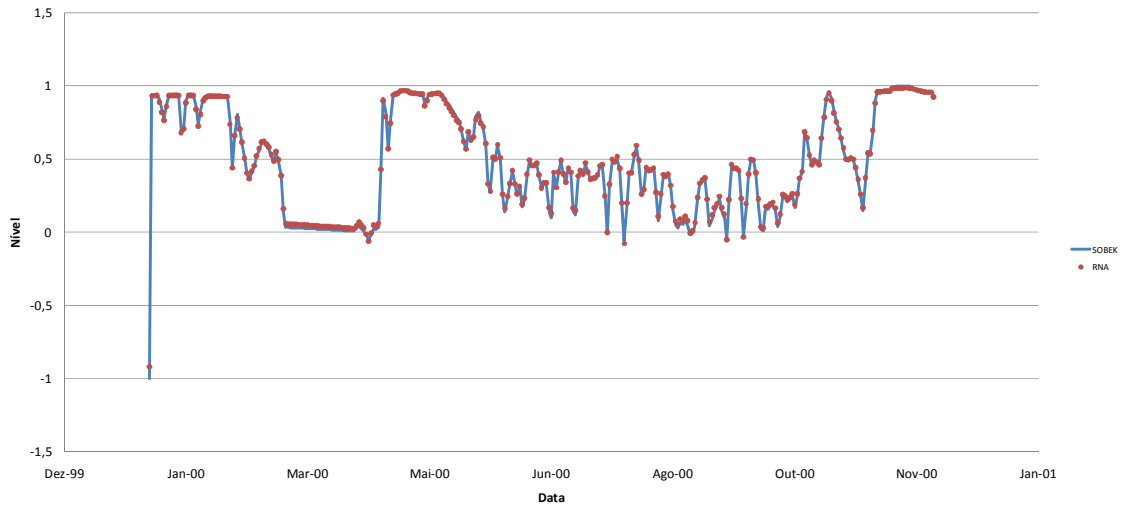


Figura 4.17 - Comparação entre os resultados do SOBEK e RNA (reais) para o nível (RNA-HE3)

Os valores dos coeficientes de correlação são apresentados no Quadro 4.2.

Quadro 4.2 – Coeficientes de correlação resultantes das redes emuladoras hidrodinâmicas

RNA	CORREL.
RNA-HE1	0,96
RNA-HE2	0,92
RNA-HE3	1,00

Do quadro apresentado, verifica-se que todos os coeficientes de correlação se situaram acima de 0,90, tendo a rede RNA-HE3 atingido a unidade (correlação perfeita). Estes valores revelam uma grande aproximação entre a rede emuladora após o respectivo treino e o algoritmo de cálculo hidrodinâmico do SOBEK para o modelo criado.

Na RNA-HE1, cálculo do caudal em Barcelos utilizando os valores da fronteira do modelo na Caniçada, o emulador revela uma boa aproximação ao modelo SOBEK, acompanhando as oscilações de caudal verificadas. Há, no entanto, um ligeiro desfasamento entre o valor SOBEK e o resultante do emulador, que percorre todo o gráfico de resultados.

Na RNA emuladora RNA-HE2 a variável a calcular é o nível, outro dos resultados possíveis do SOBEM, tendo sido mantida a mesma variável de entrada, o caudal efluente da Caniçada (fronteira do modelo SOBEM). Comparativamente com o emulador anterior, a correlação é marginalmente inferior, motivada por algumas inconsistências nas oscilações. Verifica-se também um ligeiro desfasamento constante ao longo da simulação.

Na última rede emuladora, a RNA-HE3, há uma total afinidade entre valores de caudal e nível, pelas mesmas razões já apontadas anteriormente e que resultam da grande afinidade entre as duas variáveis.

## 4.2 QUALIDADE DA ÁGUA

Na qualidade da água foram relacionadas as concentrações de OD, CBO<sub>5</sub>, Streptococos Fecais e Coliformes Fecais e Totais. Procurou-se, com estes exercícios, estabelecer relações, de cada uma das variáveis, entre as suas concentrações nas duas estações de monitorização e em diferentes pontos do modelo, no caso da emulação, e, num exemplo específico a apresentar, a concentração de duas variáveis no mesmo local.

### 4.2.1 Regressão

À semelhança da hidrodinâmica, a regressão na qualidade da água permite ajustar uma RNA a uma série de registos, sendo posteriormente comparado o resultado das simulações com os registos originais e que serviram de treino à rede.

#### 4.2.1.1 Determinação da concentração de CBO<sub>5</sub> em Barcelos através da concentração da mesma variável na Caniçada

Para esta avaliação foi criada uma RNA que permitisse encontrar uma relação entre as concentrações de CBO<sub>5</sub> na barragem da Caniçada e em Barcelos.

A Figura 4.18 representa a série de registos de concentração de CBO<sub>5</sub> na barragem da Caniçada e em Barcelos.

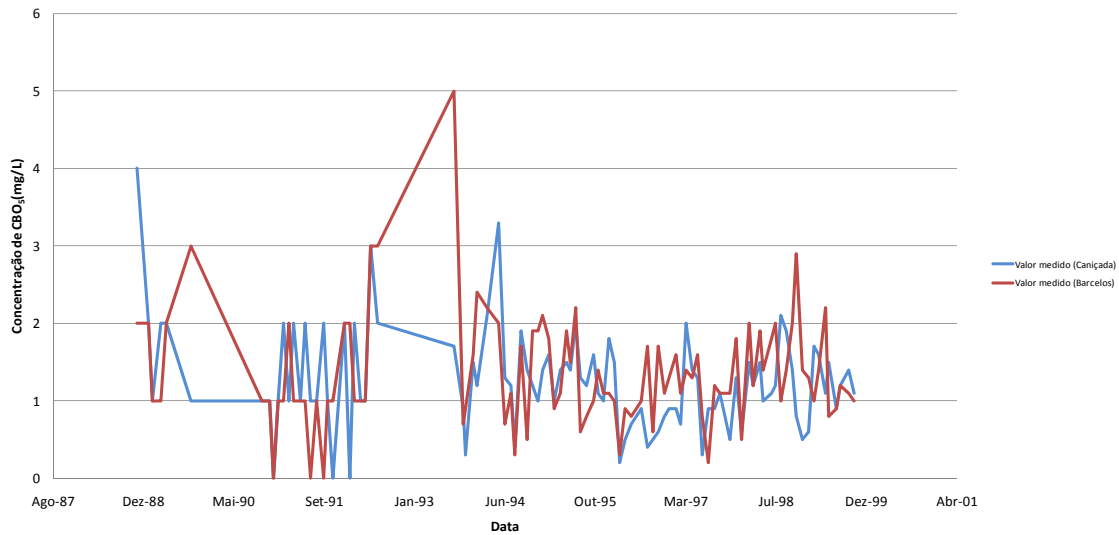


Figura 4.18 - Série de valores monitorizados da concentração de CBO<sub>5</sub> na barragem da Caniçada e em Barcelos (Novembro de 1988 a Setembro de 1999)

Das redes neuronais criadas para a avaliação desta variável, obteve-se melhores resultados com três neurónios, resultando um coeficiente de correlação de 0,34.

A Figura 4.19 faz uma comparação entre os gráficos de registos e resultados transformados, após a fase de treino da rede.

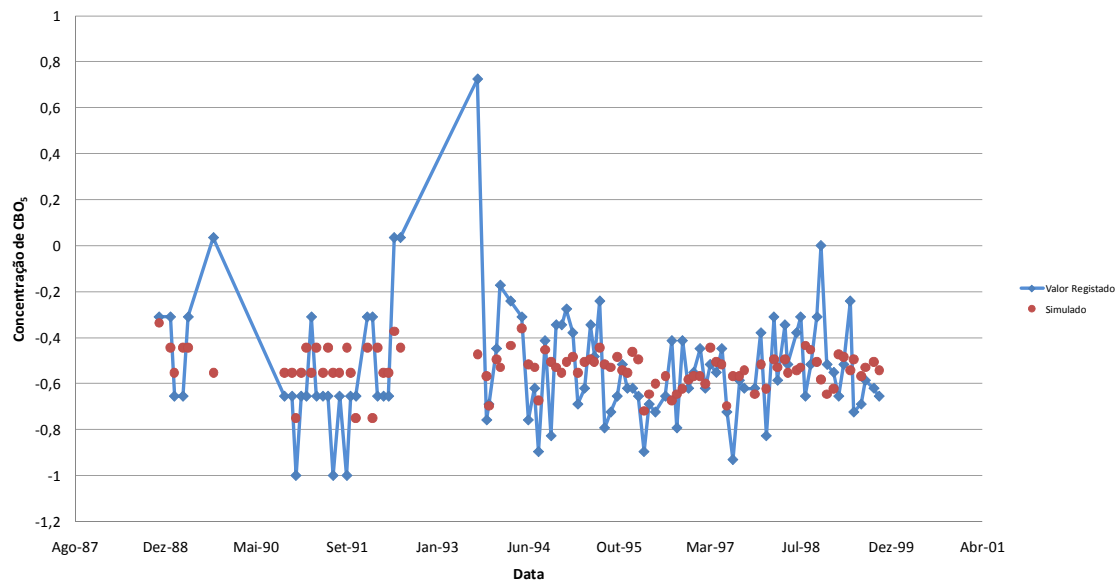


Figura 4.19 - Comparação entre valores monitorizados e simulados (transformados) para a concentração de CBO<sub>5</sub> em Barcelos (Novembro de 1988 a Setembro de 1999)

Pelo valor do coeficiente de correlação e gráfico de resultados apresentados, é possível verificar que a RNA não apresenta um resultado satisfatório. Este resultado deve-se, essencialmente, a dois factores. O primeiro está directamente relacionado com o grau de ligação entre os dados de entrada e saída, neste caso, concentrações de  $\text{CBO}_5$  na Caniçada e Barcelos, respectivamente. Pela análise da informação produzida, a influência da concentração de  $\text{CBO}_5$  na barragem da Caniçada na concentração da mesma variável em Barcelos poderá não ser significativa, existindo fontes tóxicas e difusas no trecho compreendido entre as duas estações que contribuirão com um peso superior para a concentração em Barcelos. O segundo factor e igualmente decisivo para os resultados apresentados, é a existência de uma série reduzida de registos de monitorização compatíveis entre as duas estações, limitando a gama de valores utilizados no treino.

#### 4.2.1.2 Determinação da concentração de OD em Barcelos através da concentração da mesma variável na Caniçada

Para esta avaliação foi criada uma RNA que permitisse encontrar uma relação entre as concentrações de OD na barragem da Caniçada e em Barcelos.

A Figura 4.20 representa a série de registos de concentração de OD na barragem da Caniçada e em Barcelos.

Das redes neuronais criadas para a avaliação desta variável, obteve-se melhores resultados com cinco neurónios, resultando um coeficiente de correlação de 0,67.

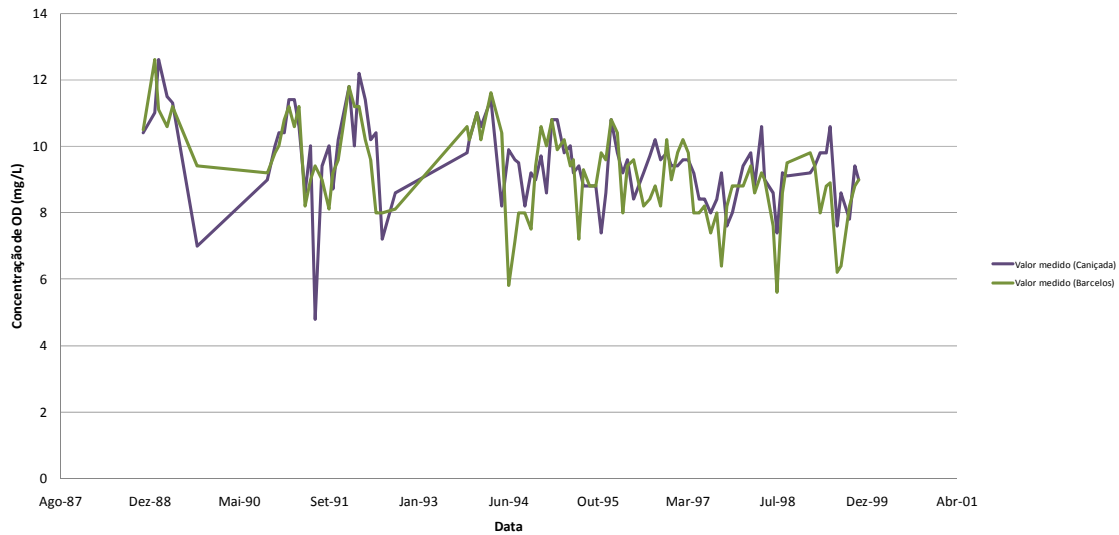


Figura 4.20 - Série de valores monitorizados da concentração de OD na barragem da Caniçada e em Barcelos (Novembro de 1988 a Outubro de 1999)

A Figura 4.21 faz uma comparação entre os gráficos de registos e resultados transformados, após a fase de treino da rede.

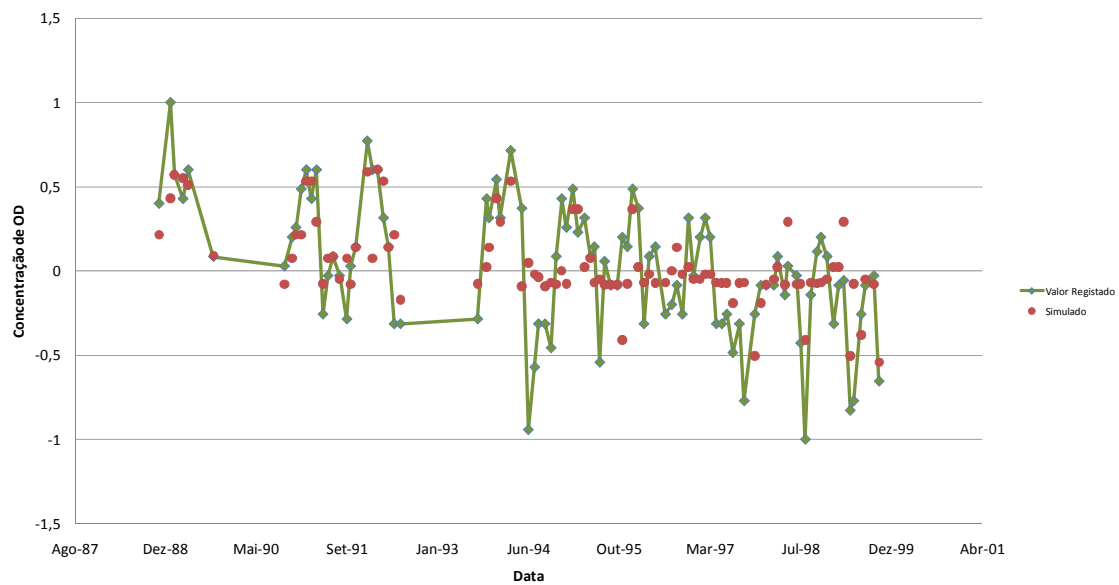


Figura 4.21 - Comparação entre valores monitorizados e simulados (transformados) para a concentração de OD em Barcelos (Novembro de 1988 a Outubro de 1999)

Pela análise dos resultados apresentados e comparando-os com os da RNA criada para a concentração de  $CBO_5$ , verifica-se uma afinidade superior entre os registos da

estação da barragem da Caniçada (entrada) e os registos da estação de Barcelos (saída). Ainda que, também nesta rede, os dados utilizados para o treino fossem igualmente reduzidos, poder-se-á depreender desta melhoria da relação entre dados de entrada e saída que os valores da concentração de OD, no trecho compreendido entre as duas estações, não sofrem alterações tão significativas quanto as verificadas na concentração de CBO<sub>5</sub>. Esta relação já possibilita, ao contrário do que acontecia no ponto anterior, a determinação de um valor aproximado da concentração de OD em Barcelos, utilizando apenas a sua concentração na Caniçada.

#### 4.2.1.3 Determinação das concentrações de Coliformes em Barcelos através da concentração da mesma variável na Caniçada

Para esta avaliação foram criadas três RNA distintas que permitissem encontrar uma relação entre as concentrações de Coliformes Totais, Fecais e *Streptococcus Fecalis* na barragem da Caniçada e em Barcelos.

As Figuras 4.22, 4.23 e 4.24 representam as séries de registos de concentração de Coliformes Totais, Fecais e *Streptococcus Fecalis*, respectivamente, na barragem da Caniçada e em Barcelos.

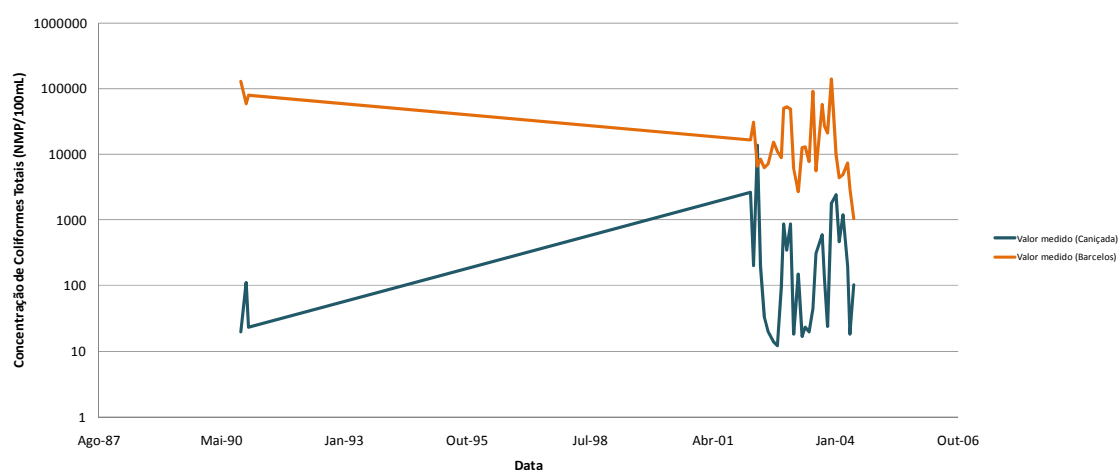


Figura 4.22 - Comparação entre valores monitorizados e simulados para a concentração de Coliformes Totais em Barcelos (Outubro de 1990 a Junho de 2004)

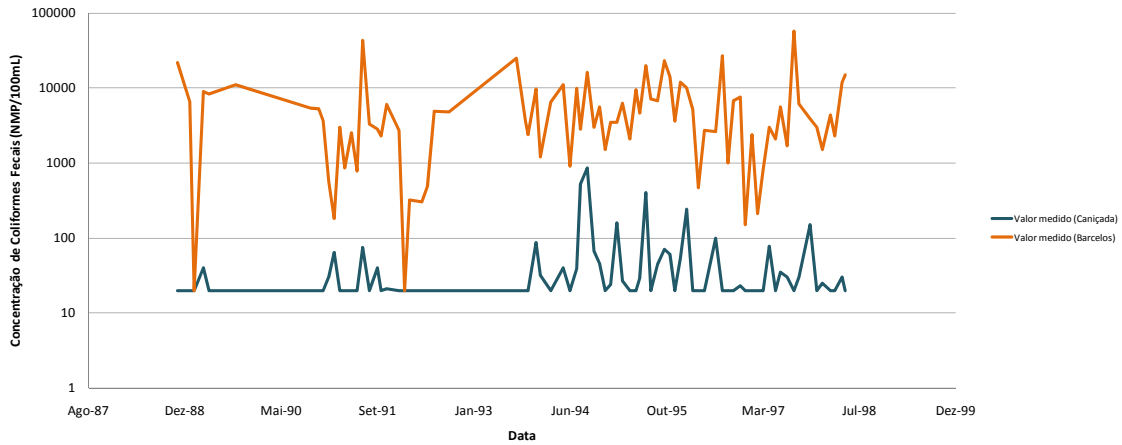


Figura 4.23 - Comparação entre valores monitorizados e simulados para a concentração de Coliformes Fecais em Barcelos (Novembro de 1988 a Maio de 1998)

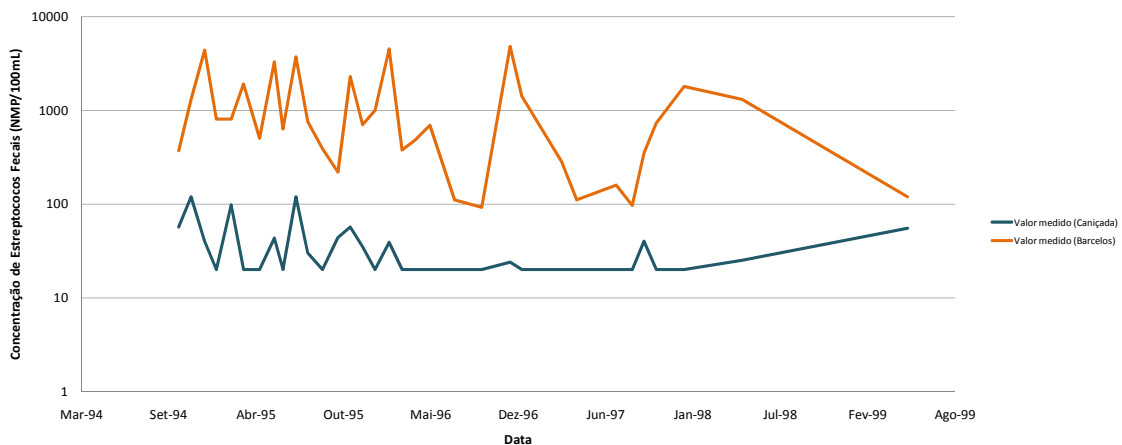


Figura 4.24 - Comparação entre valores monitorizados e simulados para a concentração de Estreptococos Fecais em Barcelos (Outubro de 1994 a Maio de 1999)

Das redes neuronais criadas para a avaliação de Coliformes Totais, Fecais e Estreptococos Fecais, obteve-se melhores resultados com quatro neurónios, para as redes de Coliformes Totais e Estreptococos Fecais, e cinco neurónios para a rede de Coliformes Fecais. Os coeficientes de correlação foram 0,46, 0,25 e 0,47 para as redes de Coliformes Totais, Coliformes Fecais e Estreptococos Fecais, respectivamente.

As Figura 4.25, 4.26 e 4.27 fazem uma comparação entre os gráficos de registos e resultados transformados, após a fase de treino da rede.



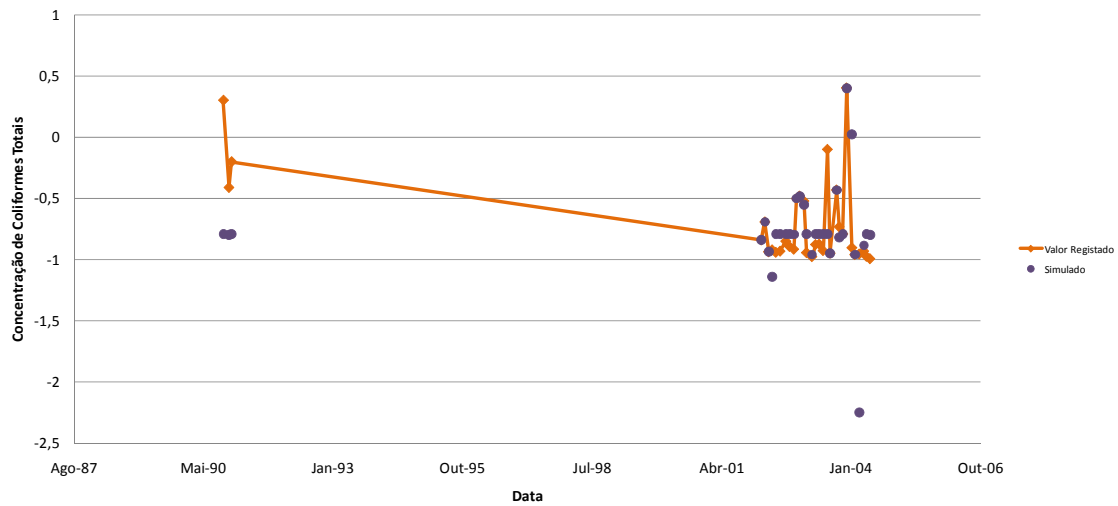


Figura 4.25 - Comparação entre valores monitorizados e simulados (transformados) para a concentração de Coliformes Totais em Barcelos (Outubro de 1990 a Junho de 2004)

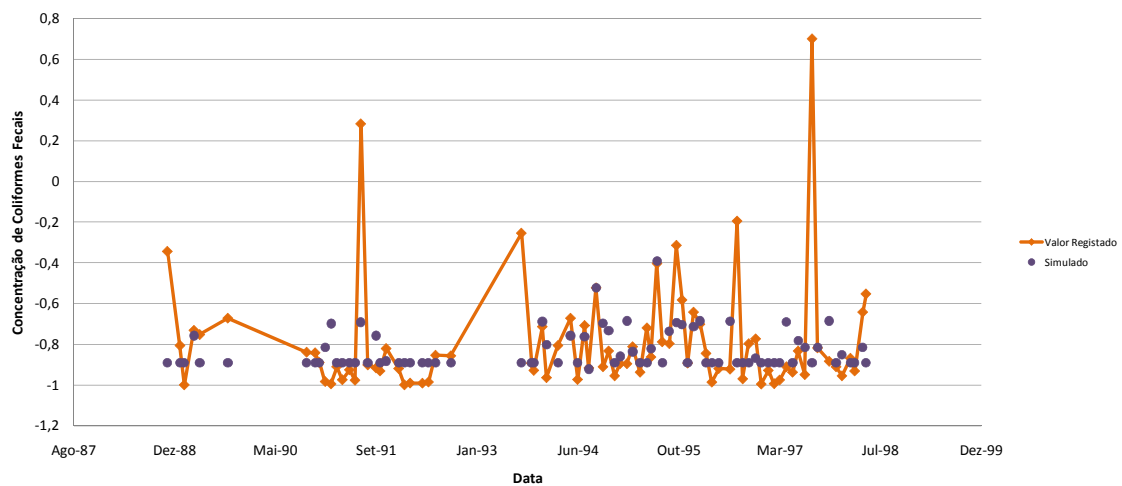


Figura 4.26 - Comparação entre valores monitorizados e simulados (transformados) para a concentração de Coliformes Fecais em Barcelos (Novembro de 1988 a Maio de 1998)

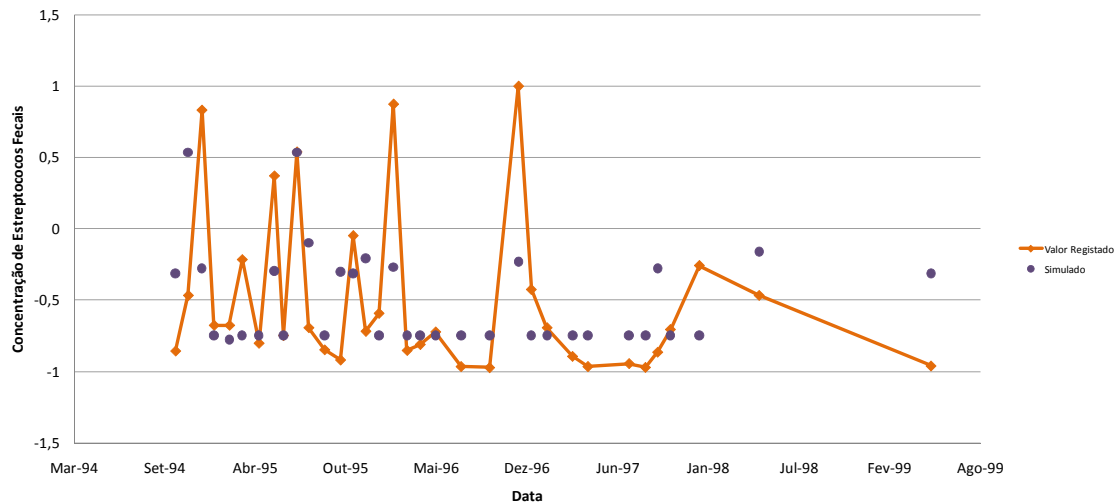


Figura 4.27 - Comparação entre valores monitorizados e simulados (transformados) para a concentração de Coliformes Fecais em Barcelos (Outubro de 1994 a Maio de 1999)

Dos resultados obtidos nas três redes para os três microrganismos considerados, destaca-se a rede de Coliformes Fecais como tendo o coeficiente de correlação mais baixo (0,25). Ainda que a esta rede tenham sido adicionados um maior número de dados de entrada e saída comparativamente com as redes para os restantes microrganismos, não há uma relação forte entre estes dados. Este facto acentua-se, principalmente, na existência picos de concentração de Coliformes Fecais em Barcelos, cuja origem não será, pela análise dos gráficos, da água existente na albufeira da Caniçada.

A relação de Coliformes Totais e Estreptococos Fecais entre Caniçada e Barcelos é um pouco mais visível do que nos Coliformes Fecais, sendo possível observar, pelos registos de monitorização, repercussões em Barcelos da variação de concentração destes microrganismos na Caniçada. Os coeficientes de correlação apresentados traduzem essa mesma melhoria. Há, no entanto, que salientar a existência de um valor, nos resultados da simulação de Coliformes Totais, fora do intervalo de dados definido  $[-1,1]$ . Este resultado deve-se ao fenómeno já mencionado de atribuir pesos com o objectivo único de melhorar o coeficiente de correlação da série, mesmo implicando o aparecimento de valores fora do domínio das séries de treino.

#### 4.2.1.4 Determinação da concentração de OD em Barcelos através da concentração da CBO<sub>5</sub> na mesma estação

Para esta avaliação foi criada uma RNA que permitisse encontrar uma relação entre as concentrações de OD e CBO<sub>5</sub> em Barcelos, de acordo com os registos de monitorização já apresentados.

Das redes neurais criadas para a avaliação desta variável, obteve-se melhores resultados com seis neurónios, resultando um coeficiente de correlação de 0,33.

A Figura 4.28 faz uma comparação entre os gráficos de registos e resultados transformados, após a fase de treino da rede.

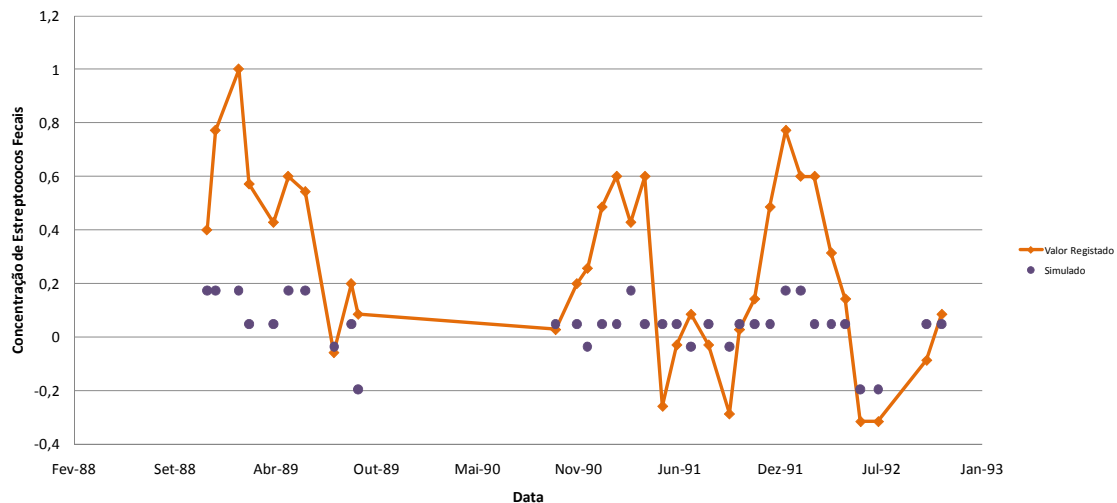


Figura 4.28 - Comparação entre valores monitorizados e simulados (transformados) para a concentração de OD em Barcelos (Novembro de 1988 a Maio de 2005)

Pela análise do coeficiente de correlação produzido e do gráfico comparativo entre dados medidos e calculados, é possível verificar a frágil relação entre os dados de base à RNA e os resultados produzidos. Tal como já referido anteriormente e excluindo desta análise o factor influente da escassez de dados para o treino, esta situação é, mais uma vez, reveladora da existência de outras variáveis mais influentes do que a concentração de CBO<sub>5</sub> para a determinação da concentração de OD, ambas em Barcelos. Ao contrário das situações anteriores em que eram comparadas as mesmas variáveis em pontos distintos e cuja existência de fontes de poluição intermédias

poderia influenciar directamente os resultados, nesta simulação não há preponderância do factor espacial, sendo apenas possível considerar que outras variáveis locais poderão igualmente ter influência sobre a concentração de OD, como, por exemplo, as concentrações de Coliformes.

#### 4.2.1.5 Determinação da concentração de CBO<sub>5</sub> em Barcelos através da concentração da mesma variável na Caniçada e em Ponte Porto

Dando continuidade ao trabalho realizado nos pontos anteriores e existindo a necessidade de avaliar a contribuição de uma estação intermédia entre os dois pontos considerados anteriormente, seleccionou-se os dados de concentração desta variável na estação de monitorização de Ponto Porto. Estes dados serão introduzidos numa nova rede, cuja variável de saída é a concentração de CBO<sub>5</sub> em Barcelos, e as variáveis de entrada serão os registos da estação da Caniçada, tal como apresentado anteriormente, aos quais se adicionaram os registos na estação de Ponto Porto.

A Figura 4.29 representa a série de registos de concentração de CBO<sub>5</sub> na barragem da Caniçada, em Ponte Porto e em Barcelos.

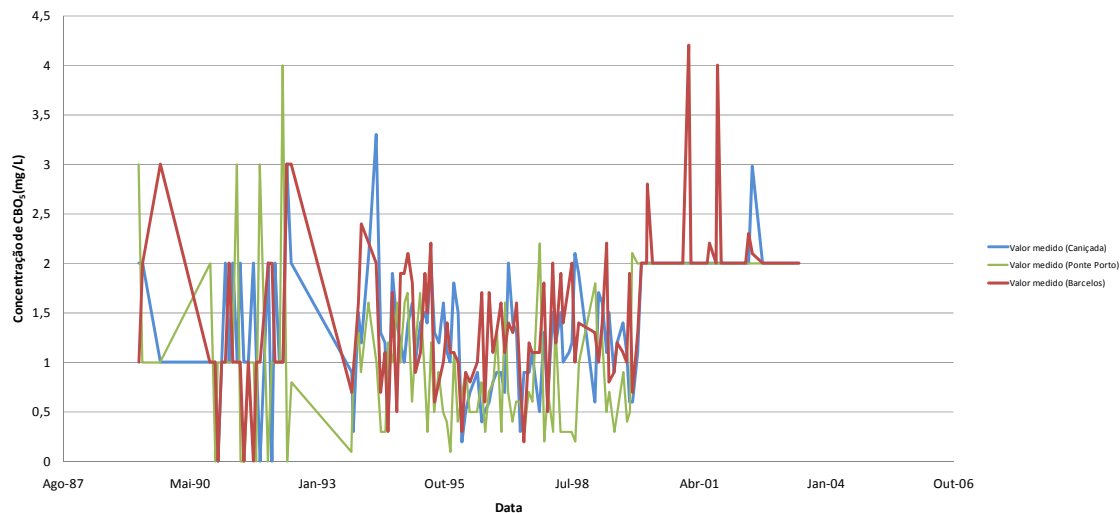


Figura 4.29 - Série de valores monitorizados da concentração de CBO<sub>5</sub> na barragem da Caniçada, em Ponte Porto e em Barcelos (Março de 1989 a Junho de 2003)

Das redes neuronais criadas para a avaliação desta variável, obteve-se melhores resultados com seis neurónios, resultando um coeficiente de correlação de 0,67.

A Figura 4.30 faz uma comparação entre os gráficos de registos e resultados transformados, após a fase de treino da rede.

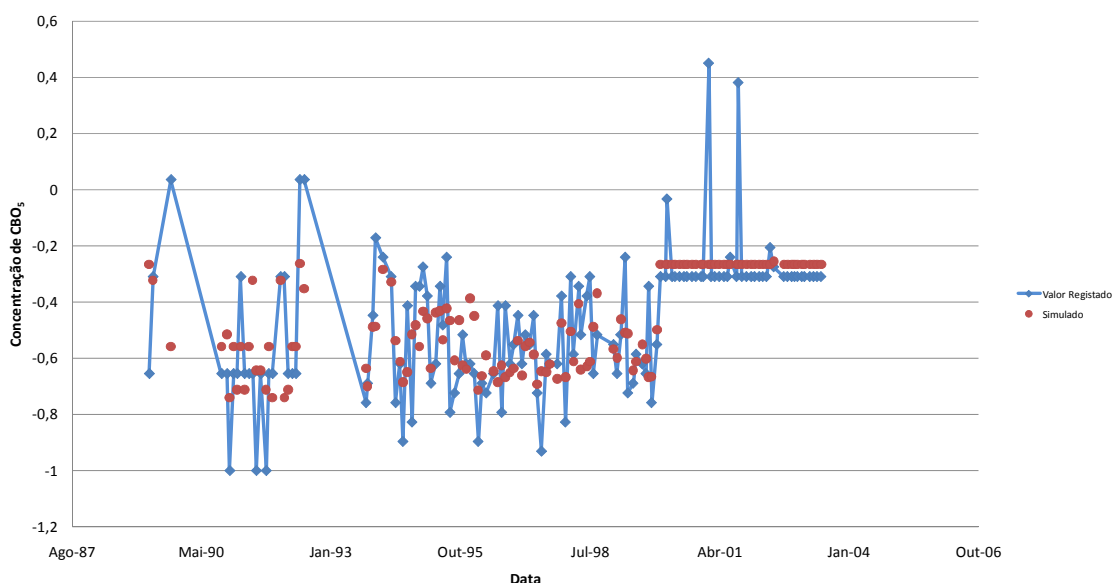


Figura 4.30 - Comparação entre valores monitorizados e simulados (transformados) para a concentração de CBO<sub>5</sub> em Barcelos (Março de 1989 a Junho de 2003)

Como é possível verificar da comparação entre os resultados obtidos sem e com os dados relativos à estação de monitorização de Ponte Porto, houve uma melhoria significativa do coeficiente de correlação entre valores registados e calculados, 0,34 para 0,67. Esta evolução deve-se à introdução de uma nova série de registos aos dados de entrada da rede, aproximando esses mesmos dados aos de saída da rede, reforçando a fraca ligação verificada no modelo anterior correspondente.

#### 4.2.1.6 Determinação da concentração de OD em Barcelos através da concentração da mesma variável na Caniçada e em Ponte Porto

Tal como no ponto anterior e com objectivos semelhantes, seleccionou-se os dados de concentração da variável OD na estação de monitorização de Ponto Porto. Estes dados serão introduzidos numa nova rede, cuja variável de saída é a concentração de OD em Barcelos, e as variáveis de entrada serão os registos da estação da Caniçada, tal como apresentado anteriormente, aos quais se adicionaram os registos na estação de Ponto Porto.

A Figura 4.31 representa a série de registos de concentração de OD na barragem da Caniçada, em Ponte Porto e em Barcelos.

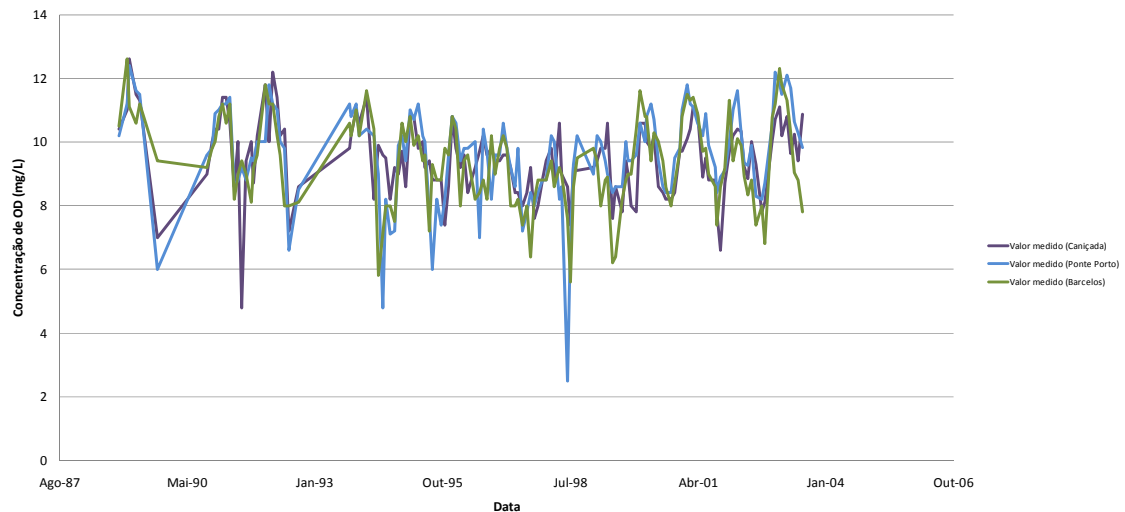


Figura 4.31 - Série de valores monitorizados da concentração de OD na barragem da Caniçada, em Ponte Porto e em Barcelos (Novembro de 1988 a Julho de 2003)

Das redes neuronais criadas para a avaliação desta variável, obteve-se melhores resultados com quatro neurónios, resultando um coeficiente de correlação de 0,77.

A Figura 4.32 faz uma comparação entre os gráficos de registos e resultados transformados, após a fase de treino da rede.

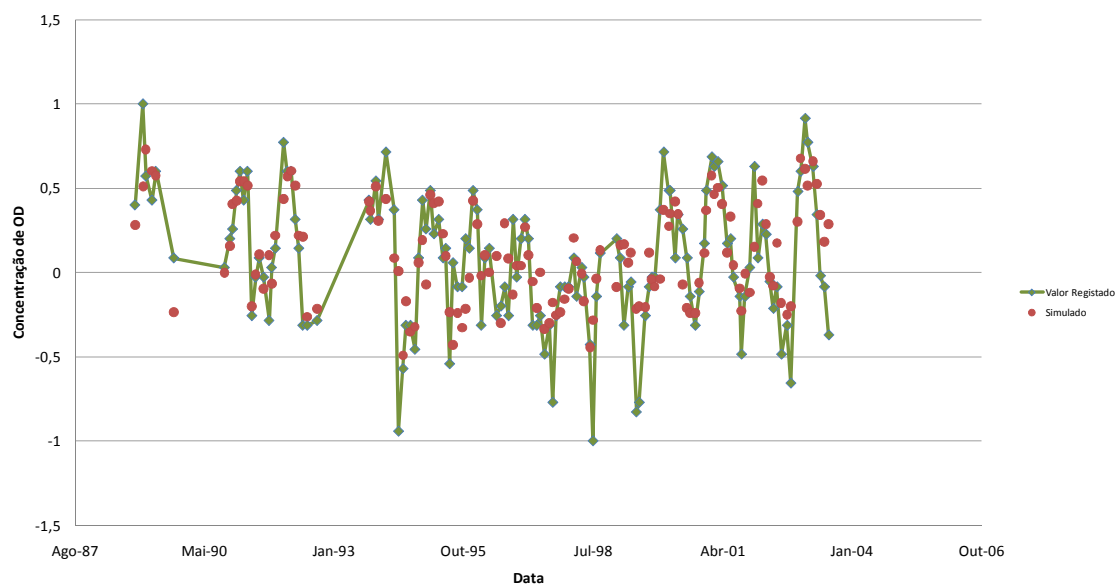


Figura 4.32 - Comparação entre valores monitorizados e simulados (transformados) para a concentração de OD em Barcelos (Novembro de 1988 a Julho de 2003)

Ainda que a diferença de resultados não seja tão visível quanto a verificada na concentração de  $CBO_5$ , há uma melhoria visível dos resultados da simulação, tanto no coeficiente de correlação como no gráfico comparativo. As razões para este progresso no desempenho da RNA são as mesmas já apontadas para as redes de concentração de  $CBO_5$  e que se prendem com a inclusão de mais registos com influência na concentração de OD em Barcelos. Há, no entanto, que referir que, por não ser um aumento tão significativo do coeficiente de correlação como o verificado na  $CBO_5$ , também o peso desta nova série de registos nas concentrações em Barcelos não é tão elevado como o verificado anteriormente.

#### 4.2.1.7 Determinação das concentrações de Coliformes em Barcelos através da concentração da mesma variável na Caniçada e em Ponte Porto

Dando continuidade ao trabalho realizado nos pontos anteriores e existindo a necessidade de avaliar a contribuição de uma estação intermédia entre os dois pontos considerados anteriormente, seleccionou-se os dados de concentração dos microrganismos na estação de monitorização de Ponto Porto. Estes dados serão introduzidos em três redes distintas, cujas variáveis de saída são a concentração de

Coliformes Totais, Fecais e Estreptococos Fecais em Barcelos, e as variáveis de entrada serão os registos da estação da Caniçada, tal como apresentado anteriormente, aos quais se adicionaram os registos na estação de Ponto Porto.

As Figuras 4.33, 4.34 e 4.35 representam as séries de registos de concentração de Coliformes Totais, Fecais e Estreptococos Fecais, respectivamente, na barragem da Caniçada e em Barcelos.

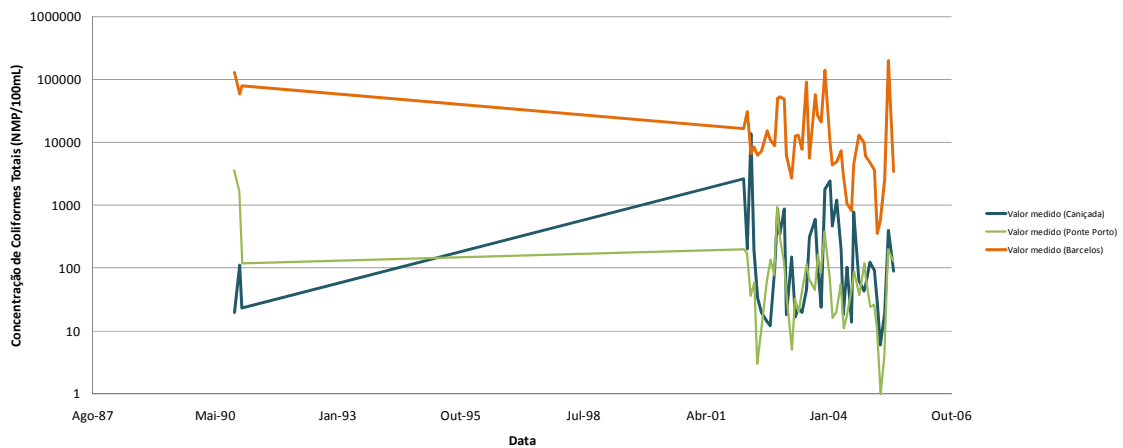


Figura 4.33 - Comparação entre valores monitorizados e simulados para a concentração de Coliformes Totais em Barcelos (Outubro de 1990 a Junho de 2005)

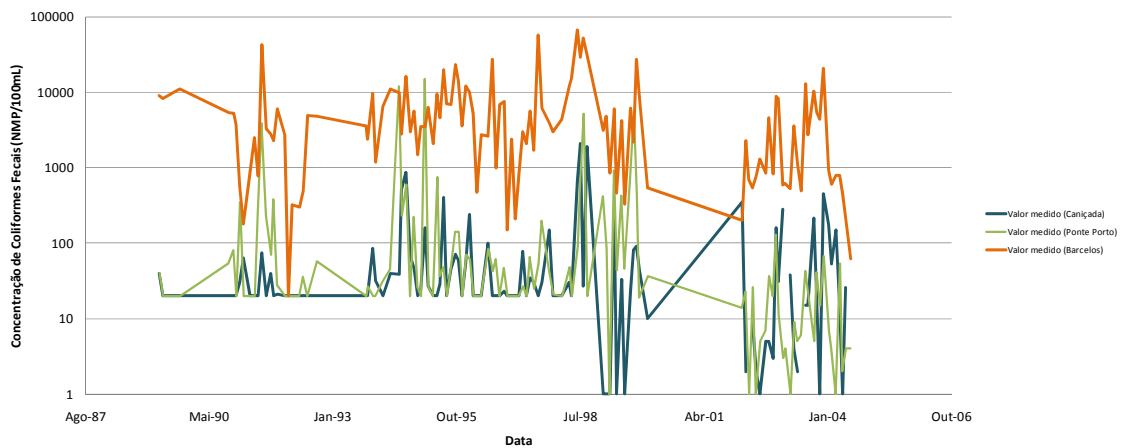


Figura 4.34 - Comparação entre valores monitorizados e simulados para a concentração de Coliformes Fecais em Barcelos (Março de 1989 a Julho de 2004)



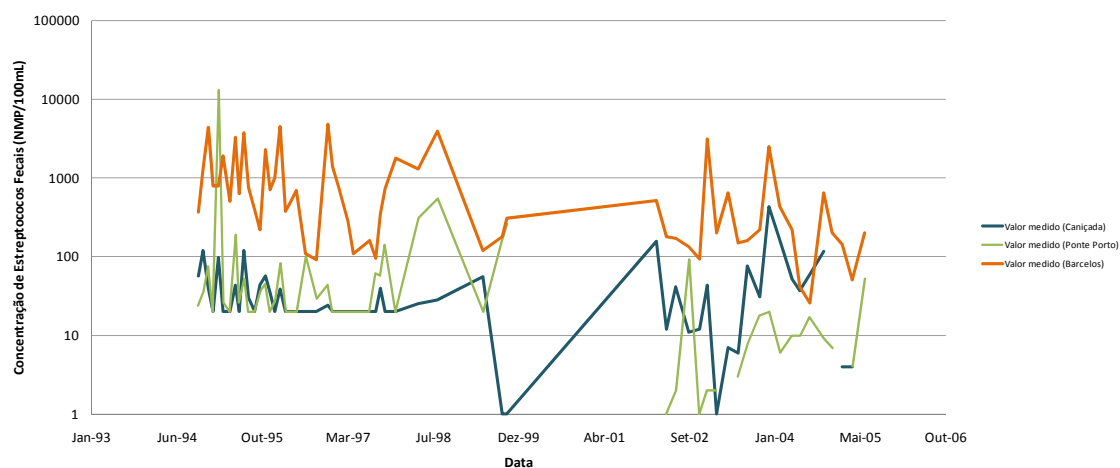


Figura 4.35 - Comparação entre valores monitorizados e simulados para a concentração de Estreptococos Fecais em Barcelos (Outubro de 1994 a Junho de 2005)

Da comparação dos coeficientes de correlação das RNA criadas com os dados de monitorização da estação de Ponte Porto e as correspondentes anteriormente criadas sem esta estação, verifica-se que se inverteram o número de neurónios das redes com melhores desempenhos, ou seja, as RNA para Coliformes Totais e Estreptococos Fecais que apresentaram um coeficiente de correlação superior (0,57 e 0,61, respectivamente) foram construídas com cinco neurónios. Na RNA para Coliformes Fecais, com um coeficiente de correlação de 0,58, foram utilizados quatro neurónios.

As Figura 4.36, 4.37 e 4.38 fazem uma comparação entre os gráficos de registos e resultados transformados, após a fase de treino da rede.

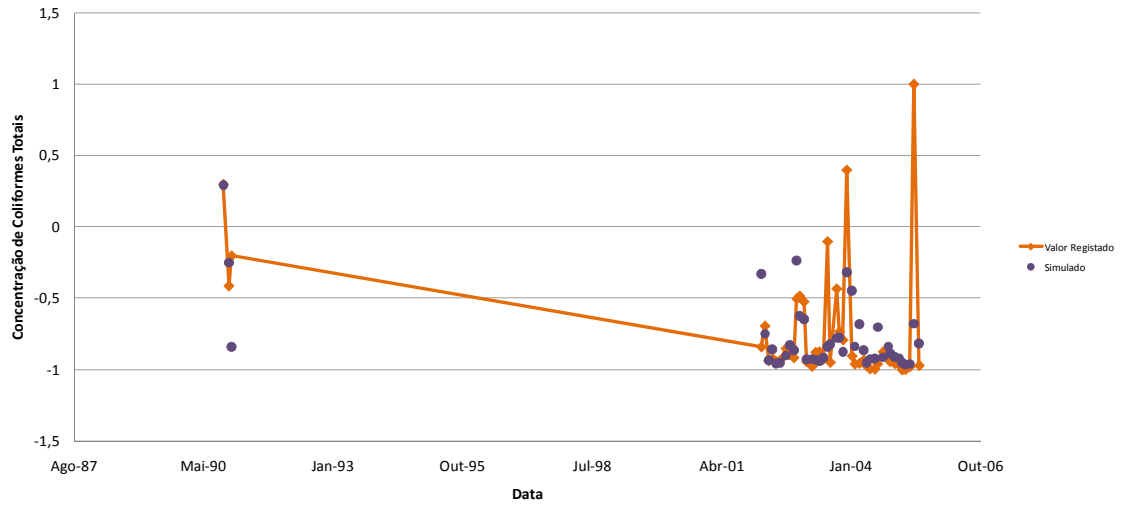


Figura 4.36 - Comparação entre valores monitorizados e simulados (transformados) para a concentração de Coliformes Totais em Barcelos (Outubro de 1990 a Junho de 2005)

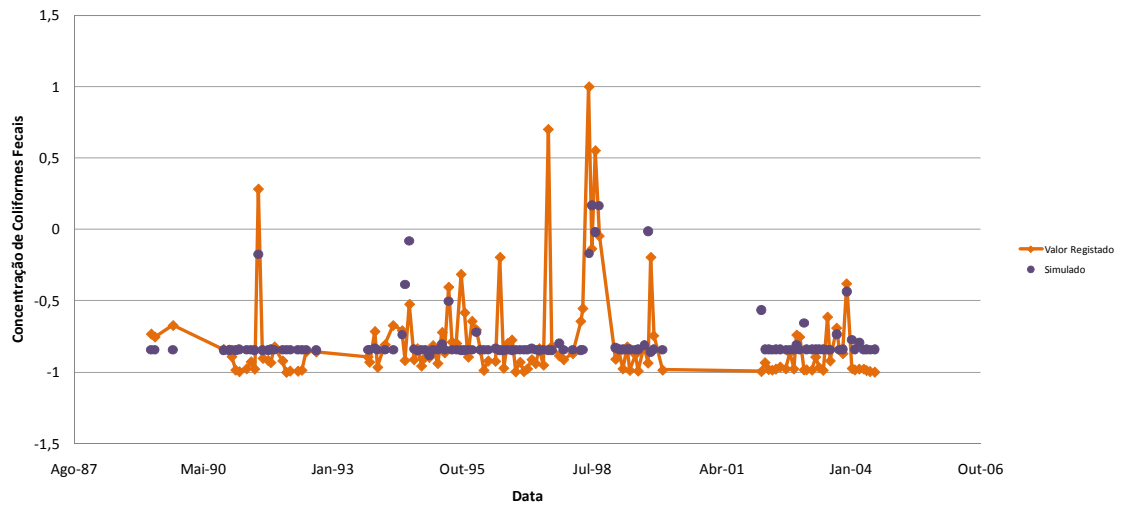


Figura 4.37 - Comparação entre valores monitorizados e simulados (transformados) para a concentração de Coliformes Fecais em Barcelos (Março de 1989 a Julho de 2004)

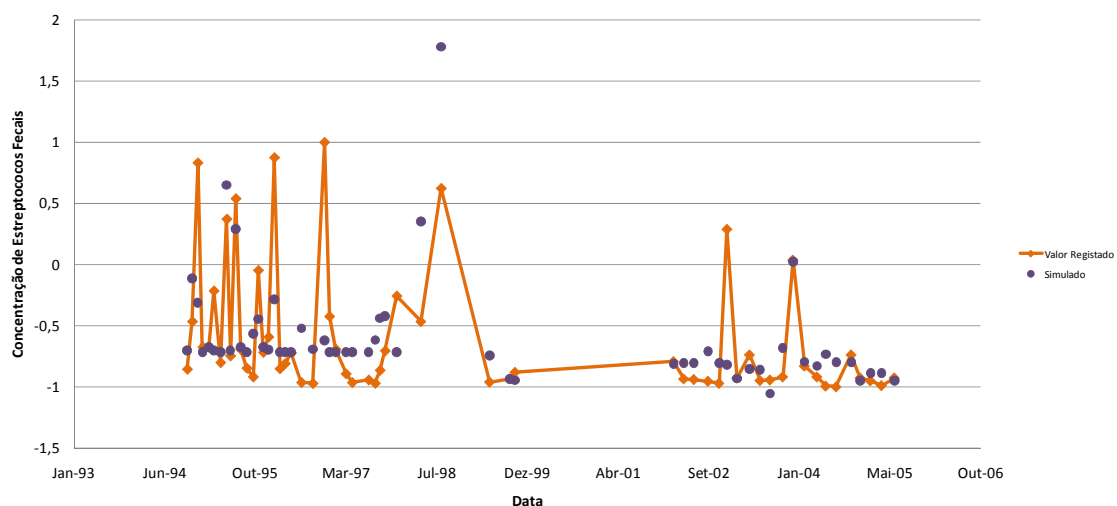


Figura 4.38 - Comparação entre valores monitorizados e simulados (transformados) para a concentração de Estreptococos Fecais em Barcelos (Outubro de 1994 a Junho de 2005)

Tal como já tinha sido demonstrado nas RNA afectas à concentração de  $CBO_5$  e OD, também foi evidente a melhoria do desempenho das redes referentes aos coliformes, especialmente na rede de Coliformes Fecais, a qual tinha tido o coeficiente de correlação mais baixo das três nas simulações sem os registos de Ponte Porto. Este é um indicador que, ao contrário das redes de Coliformes Totais e Estreptococos Fecais, a concentração de Coliformes Fecais em Barcelos dependerá mais da composição das fontes poluidoras no trecho entre a Caniçada e Barcelos do que das características da água na albufeira da Caniçada.

#### 4.2.2 Previsão

Tal como na hidrodinâmica, também nas RNA relativas à qualidade da água foram simuladas previsões com as redes correspondentes. Estas previsões baseiam-se nas redes previamente criadas e já apresentadas, sendo utilizada a segunda metade dos registos de todas as variáveis para as respectivas simulações. Todas estas redes foram desenvolvidas utilizando a primeira metade dos registos que, por razões já verificadas, nem sempre constituíram uma base sólida de informação. Para avaliação do desempenho da rede e tal como foi feito até então, comparou-se os resultados da simulação com os registos da monitorização correspondentes.

A avaliação dos resultados será feita através da comparação dos resultados da previsão com os resultados das simulações referentes ao treino das RNA correspondentes. Desta forma, criar-se-á uma base de desempenho para determinar se o treino foi ou não suficientemente abrangente ou, em alternativa, se os próprios resultados do treino foram superados.

O Quadro 4.3 contém o resumo dos coeficientes de correlação obtidos na fase de treino e na previsão correspondente.

Quadro 4.3 – Resumo comparativo dos coeficientes de correlação nas fases de treino e previsão

RNA	CORREL.(Treino)	CORREL.(Previsão)
RNA-QP1	0,34	0,47
RNA-QP2	0,67	0,60
RNA-QP3	0,46	0,47
RNA-QP4	0,25	0,26
RNA-QP5	0,47	0,13
RNA-QP6	0,33	-0,08
RNA-QP7	0,67	0,35
RNA-QP8	0,77	0,80
RNA-QP9	0,57	-0,15
RNA-QP10	0,58	0,07
RNA-QP11	0,61	-0,60

As Figuras 4.39 a 4.49 representam os gráficos dos resultados obtidos na utilização das RNA criadas para previsão da qualidade da água.

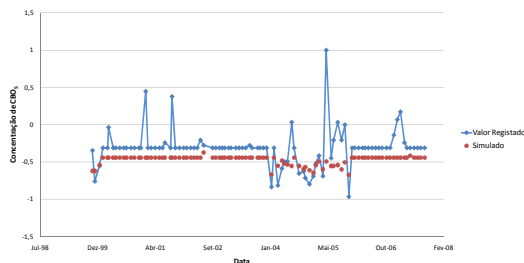


Figura 4.39 - Resultados da previsão RNA-QP1

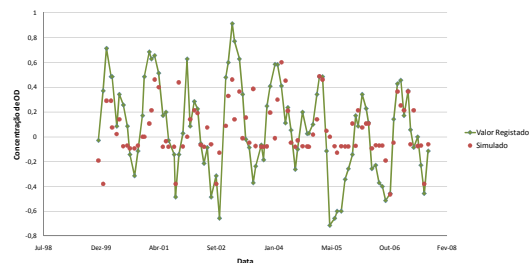


Figura 4.40 - Resultados da previsão RNA-QP2

# Aplicação de Redes Neuronais Artificiais para a criação de emuladores dos comportamentos hidrodinâmico e de qualidade de águas superficiais

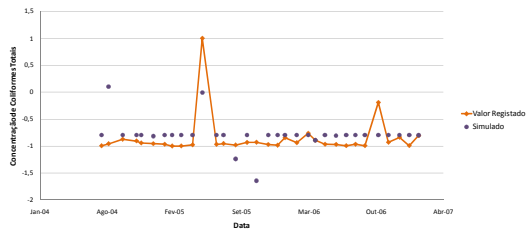


Figura 4.41 - Resultados da previsão RNA-QP3

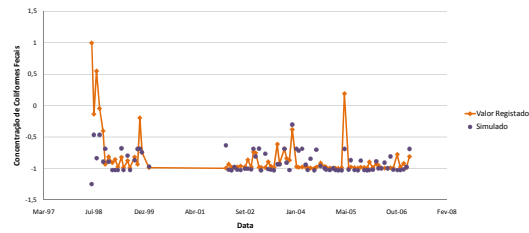


Figura 4.42 - Resultados da previsão RNA-QP4

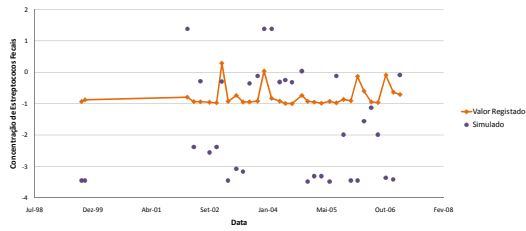


Figura 4.43 - Resultados da previsão RNA-QP5

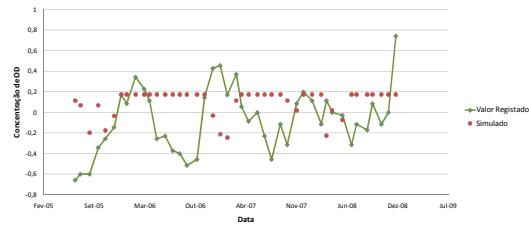


Figura 4.44 - Resultados da previsão RNA-QP6

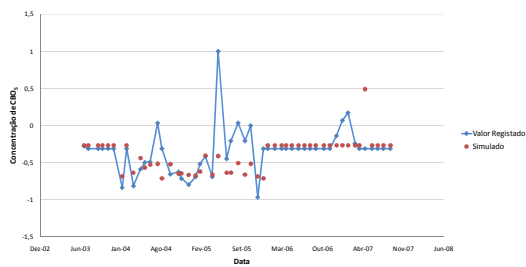


Figura 4.45 - Resultados da previsão RNA-QP7

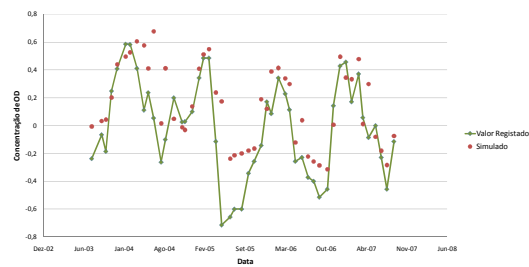


Figura 4.46 - Resultados da previsão RNA-QP8

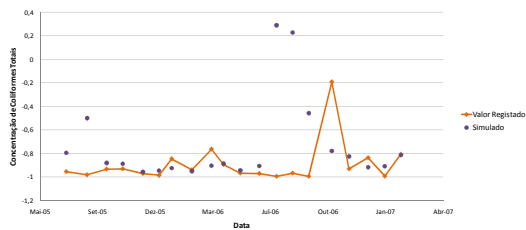


Figura 4.47 - Resultados da previsão RNA-QP9

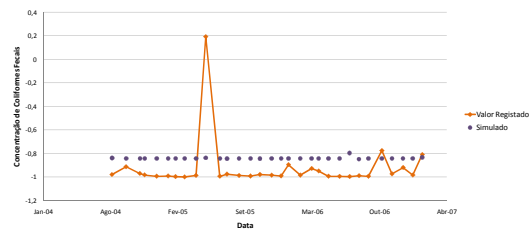


Figura 4.48 - Resultados da previsão RNA-QP10

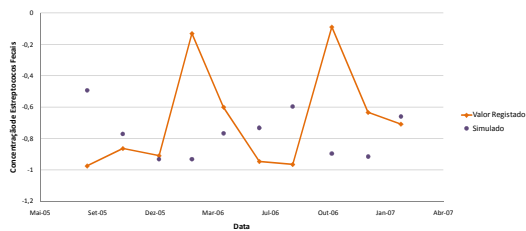


Figura 4.49 - Resultados da previsão RNA-QP11

Ao iniciar a simulação das RNA com objectivos de previsão, seria expectável que o coeficiente de correlação baixasse relativamente às simulações de treino porque, tal como já referido, as bases de treino, por razões alheias ao desenvolvimento deste trabalho, não apresentam quantidade suficiente. Isso aconteceu, tal como previsto, mas houve também situações em que esse coeficiente aumentou.

A qualidade das bases de treino influencia directamente, entre outros factores incluídos na própria construção do modelo, o desempenho da rede criada e, conseqüentemente, as suas capacidades, independentemente do fim a que se destinam. A quebra no coeficiente de correlação na previsão relativamente ao treino deve-se, principalmente, à utilização de uma série de dados de entrada para a qual a rede não foi especificamente treinada. A correlação será, por isso, tanto menor quanto maior for a diferença entre essa nova série e a série que serviu de treino à rede. Este efeito poderá ser mitigado pelo aumento da quantidade dos registos nas séries de treino, tornando-as mais abrangentes. No contexto da diminuição do coeficiente de correlação, importa referenciar os que apresentaram valores negativos (RNA-QP6, RNA-QP9 e RNA-QP11). Nestes valores houve uma alteração da correlação, resultando numa inversão da proporcionalidade entre os valores previstos e o resultado.

Pelo contrário, quando o coeficiente de correlação aumentou o resultado tornou-se mais próximo do esperado. No entanto, todas as conclusões desenvolvidas atrás aplicam-se também a esta situação embora, neste caso, o treino foi suficientemente abrangente e representativo da segunda amostra. Importante ainda acrescentar que, nos casos em que o coeficiente de correlação foi superior, a diferença foi marginal.

### 4.2.3 Emulação

Os resultados das redes emuladoras dos modelos de qualidade da água foram agregados de acordo com a variável e serão avaliados de acordo com os valores resultantes do modelo SOBEK, os quais serviram de treino às RNA construídas.

- **CBO<sub>5</sub>**

Os resultados das redes emuladoras para a variável de CBO<sub>5</sub> são apresentados no Quadro 4.4 e Figuras 4.50 e 4.51.

Quadro 4.4 – Coeficientes de correlação resultantes das redes emuladoras de qualidade da água para CBO<sub>5</sub>

RNA	CBO <sub>5</sub>	
	COEF. CORREL.	
	(Cenário 1)	(Cenário 2)
RNA-QE1	0,69	0,87
RNA-QE2	0,71	0,87
RNA-QE3	0,94	0,90
RNA-QE4	0,99	0,99

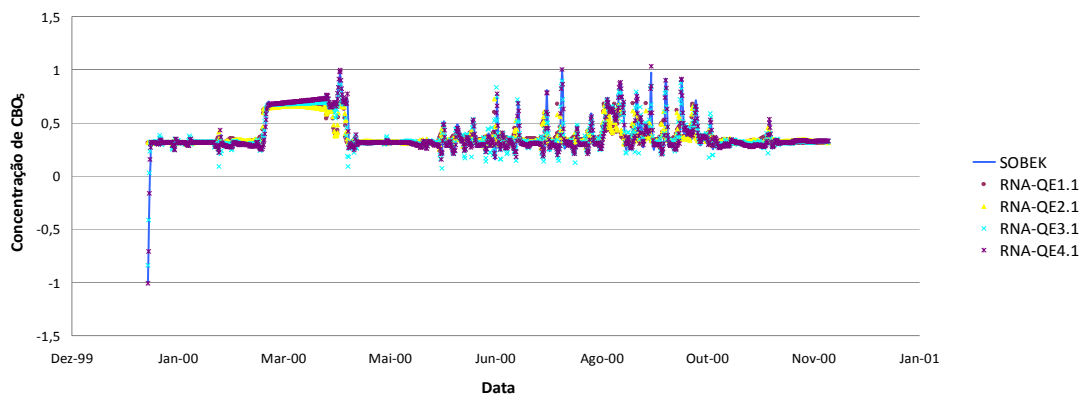


Figura 4.50 - Comparação entre os resultados do SOBEK e RNA (transformados) para CBO<sub>5</sub> (Cenário 1)

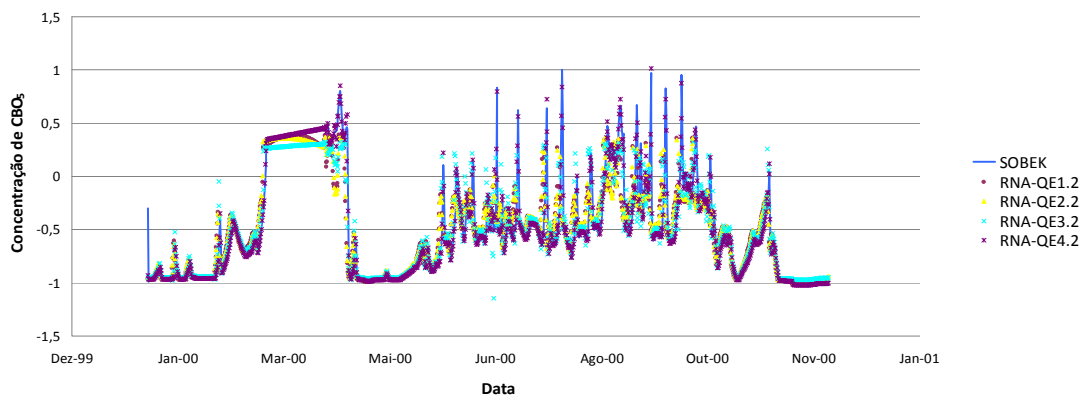


Figura 4.51 - Comparação entre os resultados do SOBEK e RNA (transformados) para CBO<sub>5</sub> (Cenário 2)

---

Em ambos os cenários afectos à concentração de  $\text{CBO}_5$  foram construídas duas RNA que apenas diferem na inclusão do caudal como entrada do modelo. Pretendeu-se com estas duas redes, avaliar se o resultado da rede com apenas uma variável de entrada e outra de saída poderia ser melhorado. De acordo com os resultados obtidos, numéricos (sob a forma do coeficiente de correlação) e gráficos, é possível observar que a inclusão do caudal não melhora significativamente os resultados das redes iniciais.

As duas restantes redes tiveram igualmente o objectivo de melhorar o desempenho da rede simples (rede com uma variável de entrada e outra de saída). Ao utilizar-se a concentração de  $\text{CBO}_5$  à saída da ETAR de Frossos (fonte tónica com maior carga poluente no trecho) como variável de entrada, o coeficiente de correlação resultante da comparação entre os valores obtidos pelo SOBEK e pela rede emuladora correspondente aumentou para 0,94. Este valor indica uma melhoria significativa dos resultados, comparativamente com os anteriores, revelando igualmente uma aproximação entre as entradas e saídas do modelo. Por último, na rede emuladora que incluía como variáveis de entrada, para além da concentração de  $\text{CBO}_5$  na Caniçada, as concentrações das quatro ETAR mais importantes do trecho (seleccionadas com o mesmo critério apontado anteriormente), o coeficiente de correlação foi de 0,99, sendo revelador de uma grande afinidade da rede emuladora com o modelo, para a variável em questão, traduzida também pelo gráfico correspondente.

Entre cenários não houve grande variabilidade de resultados, tendo os coeficientes de correlação aumentado ligeiramente, justificado por uma melhor distribuição dos registos no domínio de  $[-1,1]$  (picos de valores semelhantes). As excepções podem ser observadas nas redes RNA-QE3.1 e RNA-QE3.2. A introdução da descarga accidental e Frossos no Cenário 2 melhora os resultados das RNA emuladoras sem esta variável como dado de entrada (QE1 e QE2). Nos dois modelos restantes, QE3 e QE4, os entre cenários são aproximados. Verifica-se, pelas razões apresentadas, que uma RNA emuladora pode lidar com descargas accidentais, desde que treinada para a situação.



- **OD**

Os resultados das redes emuladoras para a variável de OD são apresentados no Quadro 4.5 e Figuras 4.52 e 4.53.

Quadro 4.5 – Coeficientes de correlação resultantes das redes emuladoras de qualidade da água para OD

RNA	OD	
	COEF. CORREL.	
	(Cenário 1)	(Cenário 2)
RNA-QE5	0,89	0,88
RNA-QE6	0,98	0,96
RNA-QE7	1,00	0,99

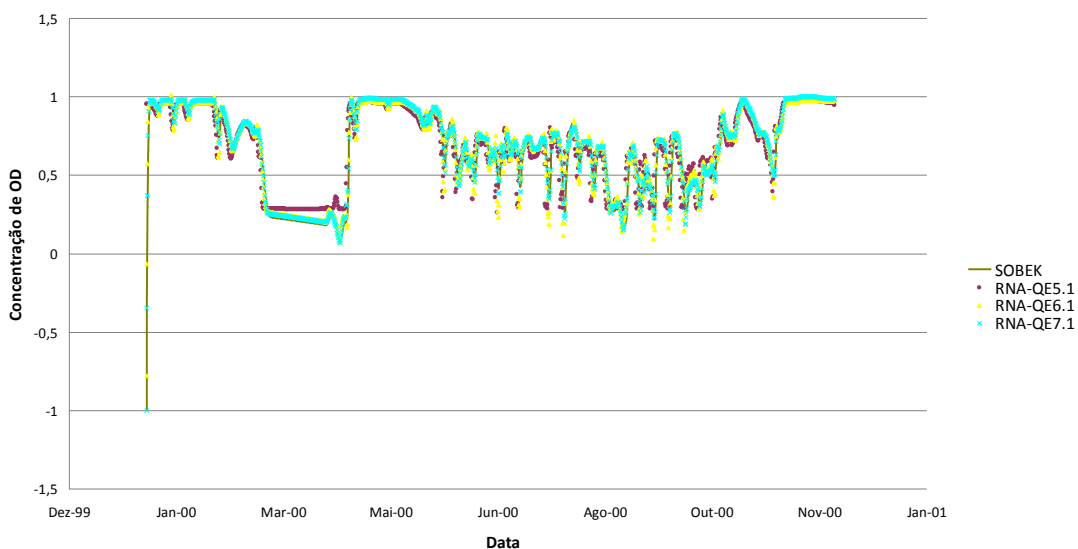


Figura 4.52 - Comparação entre os resultados do SOBEK e RNA (transformados) para OD (Cenário 1)

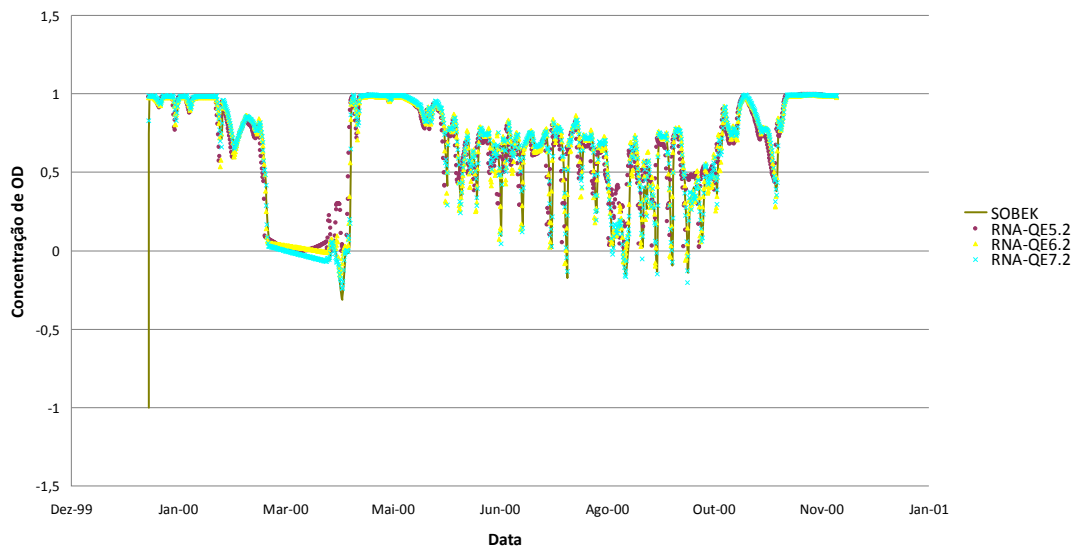


Figura 4.53 - Comparação entre os resultados do SOBEK e RNA (transformados) para OD (Cenário 2)

Para esta variável, ao contrário da variável anterior e pelas razões já apresentadas, não foi construída uma rede emuladora que utilizasse a variável caudal como dado de entrada do modelo.

Nos resultados apresentados para a variável OD, numéricos e gráficos, verifica-se uma compatibilidade com os resultados e com as justificações já apresentadas anteriormente para a variável CBO<sub>5</sub>. Há, no entanto, que destacar o aumento dos valores relativos aos coeficientes de correlação, relativamente às RNA de CBO<sub>5</sub>, tendo mesmo este valor atingido 1 em ambos os cenários. Esta situação é o reflexo da melhor relação entre dados de entrada e de saída.

- **Microrganismos**

Os resultados das redes emuladoras para a variável de Coliformes Totais, Fecais e Streptococos Fecais são apresentados no Quadro 4.6 e Figuras 4.54 a 4.59.

Quadro 4.6 – Coeficientes de correlação resultantes das redes emuladoras de qualidade da água para coliformes Totais, Fecais e Estreptococos Fecais

<b>MICROORGANISMOS</b>		
<b>RNA</b>	<b>COEF. CORREL.</b>	
	<b>(Cenário 1)</b>	<b>(Cenário 2)</b>
<b>Coliformes Totais</b>		
RNA-QE8	0,84	0,70
RNA-QE9	0,89	0,78
RNA-QE10	0,99	0,93
<b>Coliformes Fecais</b>		
RNA-QE11	0,85	0,70
RNA-QE12	0,90	0,80
RNA-QE13	0,99	0,94
<b>Estreptococos Fecais</b>		
RNA-QE14	0,82	0,69
RNA-QE15	0,88	0,77
RNA-QE16	0,98	0,94

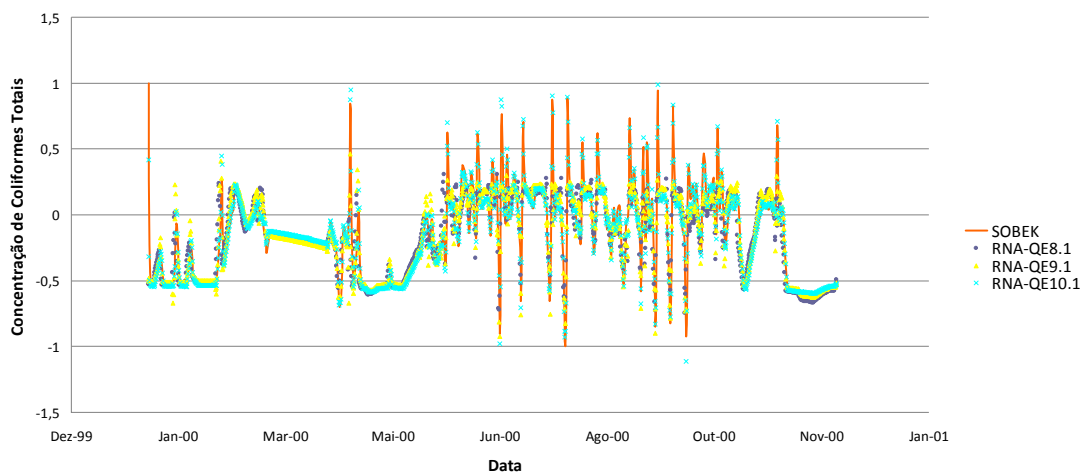


Figura 4.54 - Comparação entre os resultados do SOBEK e RNA (transformados) para Coliformes Totais (Cenário 1)

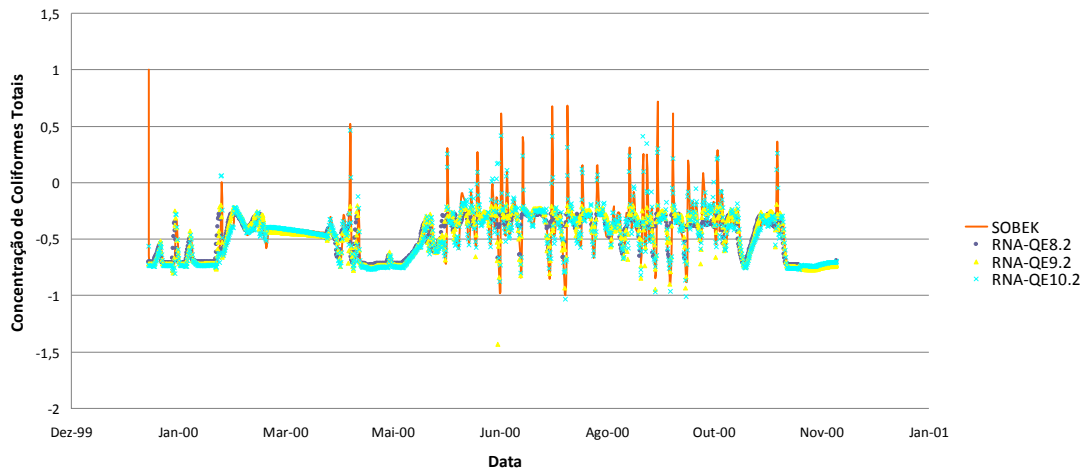


Figura 4.55 - Comparação entre os resultados do SOBEK e RNA (transformados) para Coliformes Totais (Cenário 2)

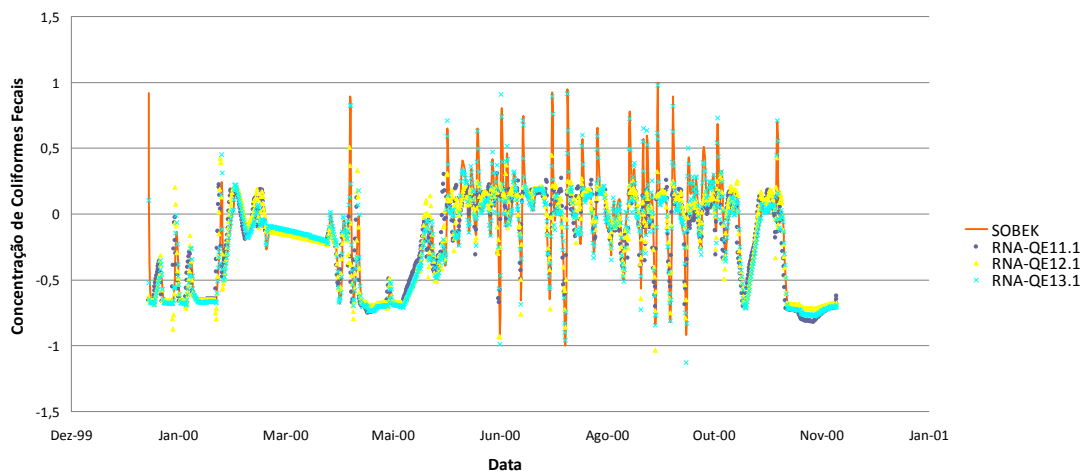


Figura 4.56 - Comparação entre os resultados do SOBEK e RNA (transformados) para Coliformes Fecais (Cenário 1)

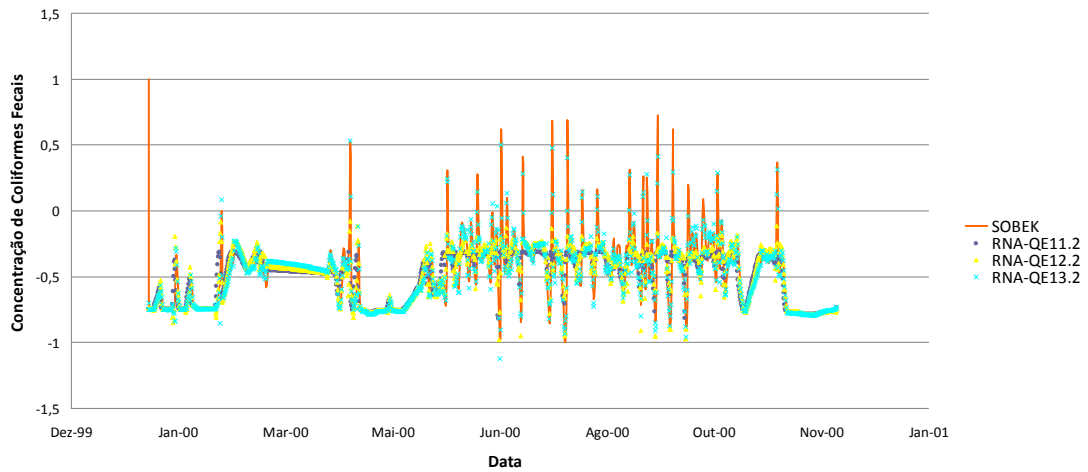


Figura 4.57 - Comparação entre os resultados do SOBEK e RNA (transformados) para Coliformes Fecais (Cenário 2)

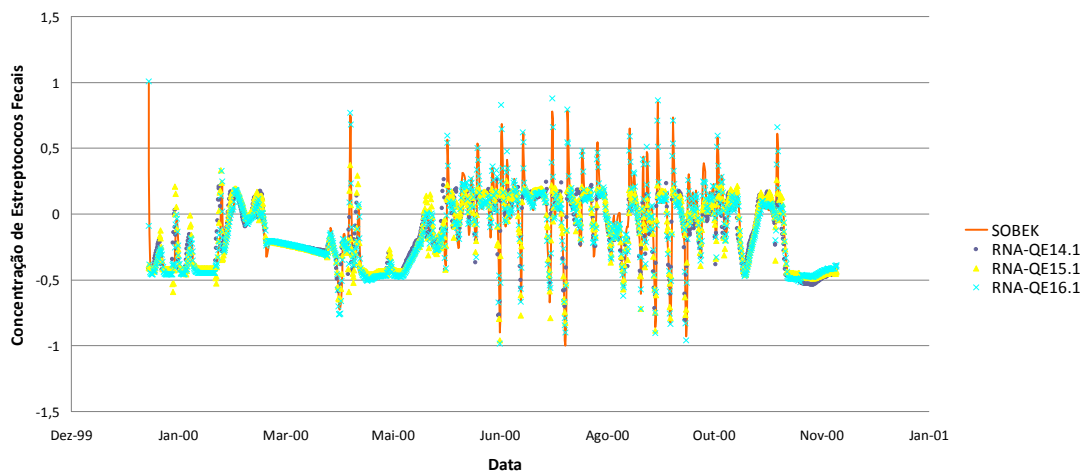


Figura 4.58 - Comparação entre os resultados do SOBEK e RNA (transformados) para Estreptococos Fecais (Cenário 1)

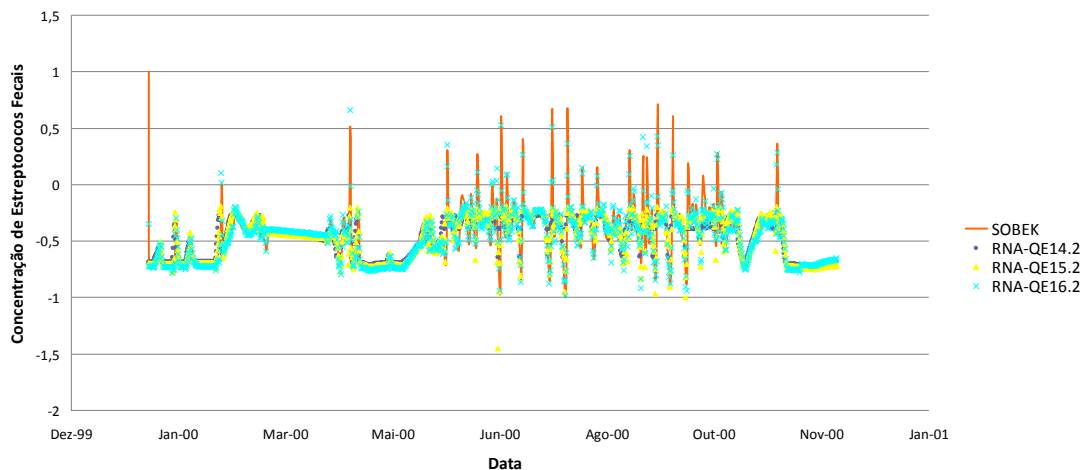


Figura 4.59 - Comparação entre os resultados do SOBEK e RNA (transformados) para Estreptococos Fecais (Cenário 2)

Com o aumento do número de variáveis de entrada na rede emuladora, os coeficientes de correlação relativos às redes apresentadas foram igualmente aumentando, tal como aconteceu nas variáveis anteriores. Este aumento, de acordo com a justificação já apresentada, deve-se à introdução de novas variáveis de entrada do modelo, aproximando a relação entre as entradas e as saídas da RNA.

Nota-se também que, neste caso, os emuladores com uma variável de entrada e outra de saída apresentam um melhor desempenho global, relativamente à variável de  $CBO_5$ .

Ao contrário do que sucedeu nas variáveis anteriores, os resultados do cenário 2 são ligeiramente inferiores aos resultados no cenário 1. Na série de registos das variáveis relativas aos microrganismos, a distribuição de valores no domínio é mais favorável no cenário 1 porque os registos não apresentam uma amplitude tão considerável quanto a verificada nos microrganismos.

- **$CBO_5$  e OD**

Os resultados das redes emuladoras que relacionam as variáveis de  $CBO_5$  e OD em Barcelos são apresentados no Quadro 4.7 e Figuras 4.60 a 4.63.

Quadro 4.7 – Coeficientes de correlação resultantes das redes emuladoras de qualidade da água para CBO<sub>5</sub> e OD

CBO <sub>5</sub> -OD		
RNA	COEF. CORREL.	
	(Cenário 1)	(Cenário 2)
RNA-QE17	0,88	0,98
RNA-QE18	0,91	0,99

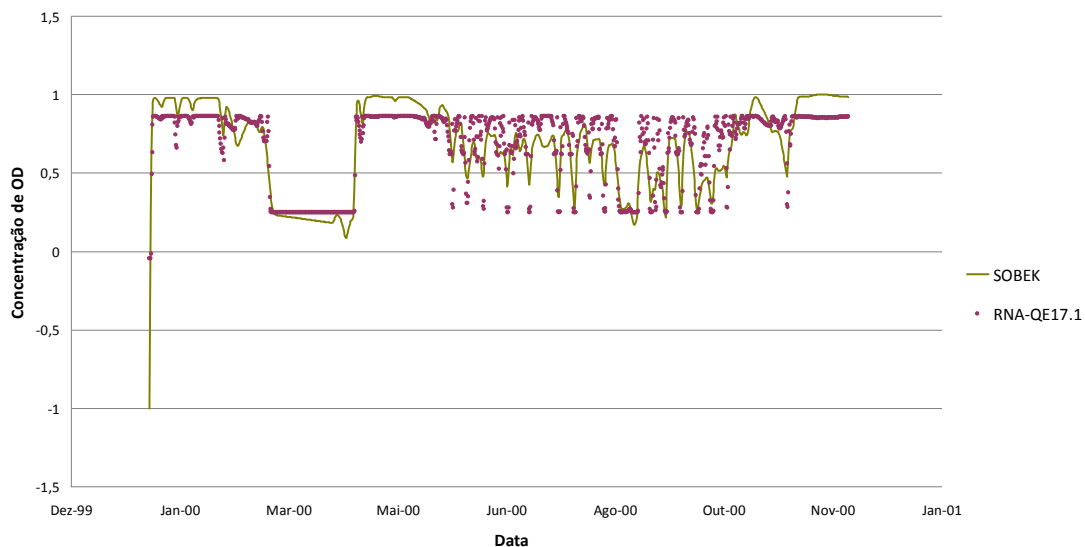


Figura 4.60 - Comparação entre os resultados do SOBEK e RNA (transformados) para OD (Cenário 1)

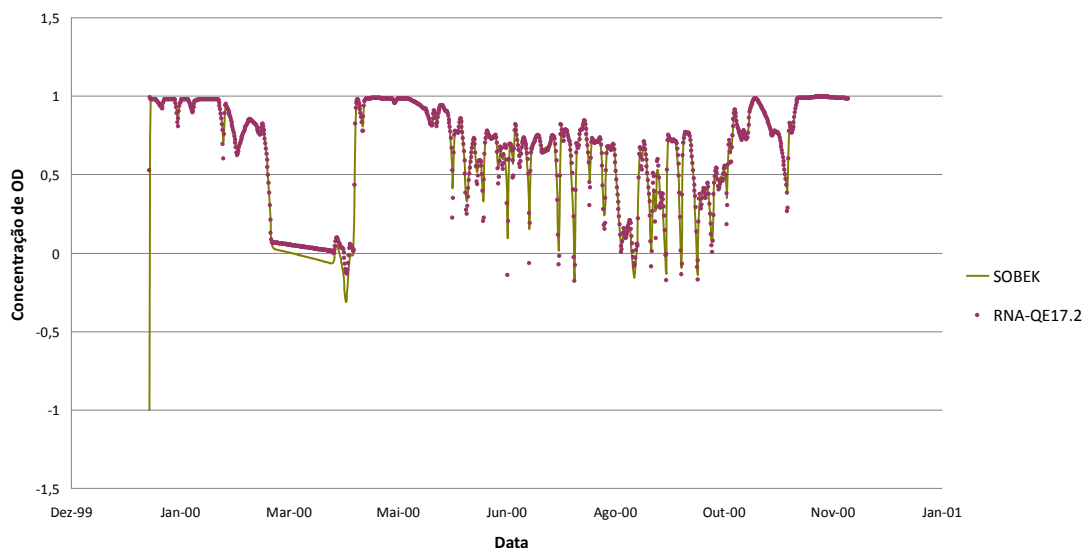


Figura 4.61 - Comparação entre os resultados do SOBEK e RNA (transformados) para OD (Cenário 2)

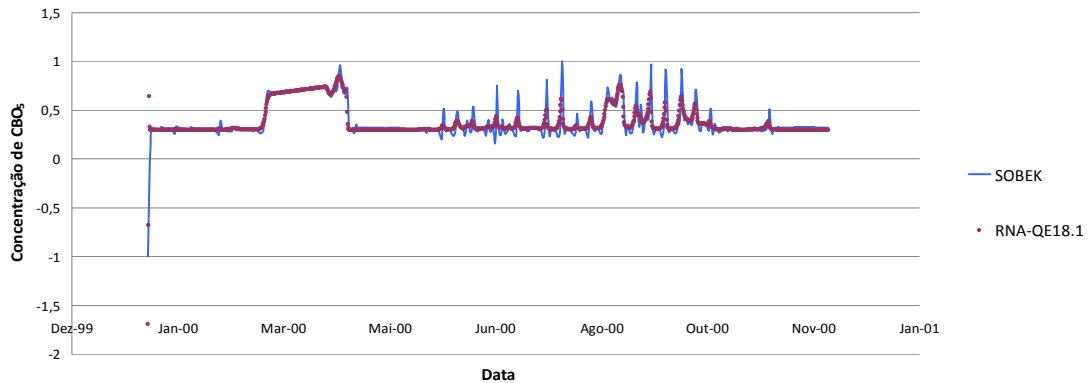


Figura 4.62 - Comparação entre os resultados do SOBEK e RNA (transformados) para CBO<sub>5</sub> (Cenário 1)

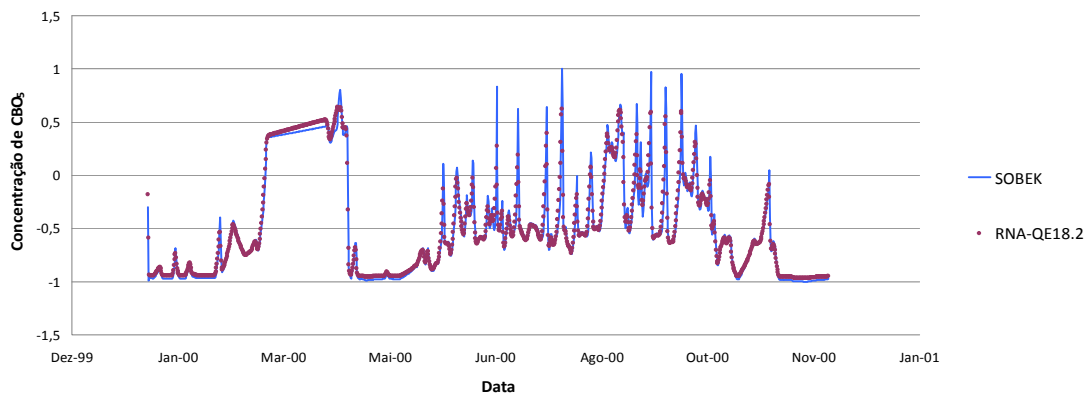


Figura 4.63 - Comparação entre os resultados do SOBEK e RNA (transformados) para CBO<sub>5</sub> (Cenário 2)

Ainda que os coeficientes de correlação apresentados para as redes RNA-QE17.1 e RNA-QE18.1 sejam próximos, verifica-se que a determinação da concentração de CBO<sub>5</sub> com base nos valores de OD apresenta melhores resultados que o inverso.

Os resultados do cenário 2 são melhores do que os resultados do cenário 1 pelos motivos já apresentados. Em ambos os cenários, principalmente no segundo, os resultados permitem verificar a adequabilidade das redes aos modelos propostos, nomeadamente nos gráficos apresentados que demonstram o ajuste dos resultados aos valores do SOBEK.





# CAPÍTULO

# 5

# CONCLUSÕES

*A auto-satisfação é inimiga do estudo. Se queremos realmente aprender alguma coisa, devemos começar por libertar-nos disso. Em relação a nós próprios devemos ser 'insaciáveis na aprendizagem' e em relação aos outros, 'insaciáveis no ensino'.*

Tse-Tung, Mao

## 5 CONCLUSÕES

Embora o modelo biológico dos neurónios seja único e sistemático, a sua complexidade motiva a existência de alguma variabilidade na sua interpretação e, especialmente, na sua modelação matemática. Por essa razão, existem diferentes modelos associados às RNA, cujos parâmetros (estrutura, aprendizagem, formulação matemática) são igualmente distintos e a sua aplicação depende, essencialmente, dos objectivos definidos para as RNA. Para se iniciar a construção de uma RNA é, por isso, essencial definir os objectivos a que esta se propõe para que o modelo a utilizar se adeque às necessidades, correndo o risco, caso tal não aconteça, que a rede criada não cumpra devidamente as suas funções, apresentando desempenhos deficitários que impliquem a impossibilidade da sua utilização.

Durante a realização do presente trabalho, houve uma dificuldade acrescida na determinação do número óptimo de neurónios a utilizar. Após alguma pesquisa, foi encontrada informação dispersa sobre metodologias para estimar este valor, umas mais complexas, outras mais simples, mas nenhuma indicava uma metodologia definitiva e eficaz que permitisse indicar um valor único que garantisse o resultado óptimo. A dificuldade encontrada foi mitigada com um procedimento simples que fornece um intervalo possível de acordo com o número de variáveis de entrada e de saída. Esta metodologia que tenta atenuar os efeitos da variabilidade do número de neurónios numa RNA, foi complementada com alargamento desse intervalo e consequente processo iterativo para encontrar o número adequado a cada modelo. Este factor poderá, muitas vezes, ser limitador da qualidade de uma RNA, condicionando todos o processo de treino e, conseqüentemente, os seus resultados. A sua definição é, por isso, essencial na tarefa de construção de RNA. A transformação e adaptação dos dados de entrada e saída ao domínio da função de activação revelou-se útil e adequada, tal como alguma bibliografia indicava, no entanto o ganho verificado nos resultados foi marginal.

O Matlab é uma ferramenta amplamente difundida e com utilizadores por todo o mundo. Esta utilização alargada permite a construção de uma base sólida e que

---

garante a confiança nos seus resultados. A sua aplicação, enquanto instrumento de desenvolvimento e simulação de RNA, é diversificada e permite uma utilização avançada ou simplificada, de acordo com a experiência e necessidades do utilizador. O presente trabalho baseou-se, maioritariamente na ferramenta mais simples com alguns dos parâmetros da rede já pré-definidos porque estes se adaptavam os objectivos do trabalho. Neste ponto e para além da definição do número de neurónios, foi dedicada especial atenção ao processo de treino. Este processo, de acordo com os parâmetros da RNA definidos, é interrompido quando o critério para o efeito é atingido (normalmente é o erro máximo por mínimos quadrados ou coeficiente de correlação). Terminado o procedimento, é possível iniciar novamente o treino, tendo como referências iniciais de pesos o resultado da rede treinada anteriormente. Este processo poderá melhorar a eficiência da rede, tornando o erro mais pequeno, mas poderá também aumentá-lo comparativamente com o inicialmente calculado (cumprindo o requisito de erro), existindo a impossibilidade de retroceder sem que isso implique construir uma nova RNA. Para que as redes pudessem ser comparadas entre si, apenas se realizou um treino para cada RNA construída.

Ultrapassadas as questões relacionadas com o modelo da RNA e respectivas ferramentas de desenvolvimento e também como base de aperfeiçoamento de conhecimentos, aplicou-se as RNA a séries reais de registos de monitorização da hidrodinâmica e da qualidade da água na bacia hidrográfica do rio Cávado. A aplicação das RNA a este tipo de dados pode ser considerada especialmente útil no preenchimento de séries incompletas, na criação de novas metodologias para relacionar variáveis (caudal e nível p.ex), substituir a medição de algumas variáveis cuja determinação por RNA não implique compromissos de precisão ou confiança e também poderá ser aplicada no apoio à decisão como ferramenta de previsão de efeitos, tendo em consideração opções de gestão. Na hidrodinâmica foram construídas RNA com o objectivo de determinar variáveis hidrodinâmicas em Barcelos, utilizando variáveis hidrodinâmicas e meteorológicas em Barcelos e na albufeira da Caniçada. A utilização da precipitação como única variável para determinar o caudal ou nível em Barcelos revelou-se, tal como seria de esperar, muito limitada. Conhecendo-se o escoamento no rio, verifica-se que o caudal descarregado na Caniçada, ainda que

possa estar directamente relacionado também com a precipitação, é essencial para caracterizar o rio. A sua inclusão como variável de entrada melhorou significativamente o coeficiente de correlação entre os registos de monitorização e resultados obtidos na rede. Este resultado é indicador da necessidade de utilizar variáveis de entrada com grande influência das variáveis de saída para garantir um resultado adequado, sob pena, caso esta premissa não seja cumprida, de se inviabilizar a utilização da RNA. É, por isso, fundamental seleccionar escrupulosamente variáveis de entrada para treino da RNA que se relacionem directamente com a de saída. Se várias influenciarem o resultado, todas deverão ser tomadas em consideração.

A utilização de RNA para a determinação da relação entre caudal e nível numa secção, actualmente feita por curvas de vazão, foi também um dos objectivos deste trabalho. Neste caso, as redes revelaram-se adequadas, com coeficientes de correlação próximos da unidade. O facto de, normalmente, estas variáveis serem relacionáveis através de uma equação construída com base em registos de medições no local, facilitou a adaptação dos pesos. A utilização da RNA poderá mesmo dispensar o cálculo de curvas de vazão, eliminando o erro resultante da regressão dos registos obtidos para a respectiva adaptação da equação.

Na qualidade da água foram construídas redes semelhantes com o objectivo de, para cada variável (CBO<sub>5</sub>, OD, Coliformes Totais, Coliformes Fecais e *Streptococcus Fecais*), determinar a concentração em Barcelos através da concentração da mesma variável na albufeira da Caniçada. Os baixos coeficientes de correlação obtidos, comparativamente com a hidrodinâmica, foram originados pelo escasso número de registos existentes na base de dados de monitorização, o que motivou a utilização de um ponto intermédio do trecho considerado que fornecesse informações sobre as concentrações das variáveis. Esta opção melhorou os resultados, aumentando em todas as simulações os coeficientes de correlação dos resultados com os registos de monitorização. Embora os registos de monitorização sejam reduzidos e isso condicione a qualidade dos resultados, a existência de fontes de poluição ao longo do trecho não contabilizadas no treino da RNA impede que os resultados fossem melhores. Tal como referido anteriormente, a introdução de variáveis de entrada com influência directa na

---

variável de saída deve sempre ser assegurada para garantir a criação de uma RNA mais adaptada à realidade e, conseqüentemente, mais flexível. Na hidrodinâmica os factores que pudessem influenciar o escoamento no trecho compreendido entre a Caniçada e Barcelos não afectavam tão significativamente as características hidrodinâmicas do rio em Barcelos, tal como aconteceu na qualidade da água.

Utilizando os modelos criados anteriormente, hidrodinâmicos e de qualidade da água, foram simuladas previsões com base em registos para os quais a rede não foi treinada. É importante, como forma de avaliar o comportamento deste tipo de ferramentas a condições desconhecidas. A previsão, neste trabalho, foi feita através da utilização de segunda metade dos registos de monitorização existentes (as redes foram treinadas com a primeira metade). Na hidrodinâmica, o coeficiente de correlação dos resultados de previsão baixaram ligeiramente, comparativamente com a simulação de treino, no entanto, são valores elevados (próximos da unidade) e que revelam a grande abrangência do treino inicial da rede. Na qualidade da água, devido ao baixo número de registos, os coeficientes de correlação foram baixos, impossibilitando a utilização das redes criadas para este fim. As RNA, embora permitam a previsão ou extrapolação de condições futuras, são muito dependentes do treino fornecido. Pelos resultados obtidos, as RNA poderão não se adaptar a qualquer tipo de previsão, especialmente as que envolvem condições extremas e que não se tenham verificado até ao momento.

A emulação de modelos SOBEK, objectivo principal do presente trabalho, envolveu um esforço inicial no levantamento do rio Cávado e conseqüente modelação no programa seleccionado. Tentou-se igualmente simular um cenário adequado à realidade e durante um período de tempo ajustado que permitisse obter dados suficientes para a criação da RNA. A precisão do modelo, influenciada pela caracterização das variáveis das estruturas associadas, validação de geometrias e calibração do modelo, apesar de ser um factor importante, não foi considerada como essencial porque não estava em causa a qualidade do modelo mas sim a sua emulação por outro tipo de modelo matemático, as RNA.

Na hidrodinâmica, os resultados das RNA emuladoras apresentaram coeficientes de correlação acima de 0,90, evidenciando um ajuste correcto e muito próximo dos resultados do SOBEK. Nas variáveis de qualidade da água, para ambos os cenários, os resultados aproximaram-se da unidade sempre que foram consideradas as fontes tópicas principais existentes no trecho compreendido entre a Caniçada e Barcelos. A introdução de uma circunstância especial, a descarga accidental na ETAR de Frossos, não constituiu um problema às redes emuladoras correspondentes, desde que devidamente treinadas. Importa ainda esclarecer que as diferenças nos coeficientes de correlação entre os dois cenários criados reside essencialmente na distribuição de valores no domínio dos valores  $[-1,1]$ . Esse factor é introduzido, principalmente, pelos instantes iniciais da simulação no SOBEK quando as concentrações das variáveis em Barcelos são nulas e vão aumentando até atingirem os valores adequados às condições de montante. Quanto maior a diferença de valores, pior será a distribuição de valores no domínio e, conseqüentemente, os resultados. No entanto, esta variabilidade não é significativa.

Os resultados dos emuladores de modelos SOBEK, tanto hidrodinâmicos como de qualidade de água, demonstram que uma ferramenta genérica de modelação matemática como as RNA, adaptável a qualquer especialidade, consegue reproduzir os resultados para os quais foi treinada com um compromisso mínimo na precisão dos resultados.

Outro factor importante e que decorre da análise realizada neste trabalho é a avaliação do tempo envolvido neste tipo de problema: o tempo investido para a construção de modelos e o tempo necessário para a realização de simulações em computador. Em aplicações específicas de desenvolvimento de modelos hidrodinâmicos e de qualidade de água como o SOBEK é necessário um trabalho exaustivo de preparação, levantamento das condições, geometrias e estruturas das linhas de água, levantamento de fontes tópicas e todo um conjunto de informações específicas necessárias para reproduzir a realidade e, neste caso específico, um rio. A transposição dos elementos recolhidos para o modelo matemático do programa é também uma etapa demorada e que requer especial atenção do utilizador.

---

Posteriormente, é necessário simular os cenários previamente definidos e calibrar o modelo de acordo com medições realizadas em pontos específicos, tarefa cujo tempo dispensado é proporcional à complexidade e período de simulação do modelo, podendo, mesmo com o poder computacional dos dias de hoje, atingir facilmente algumas horas. A RNA, por mais complexa que possa ser, é muito mais rápida de executar, demorando apenas alguns segundos (dependendo do número de neurónios e variáveis).

A informação associada aos modelos é, como é possível perceber, difícil de conseguir e os parâmetros do modelos a definir são exigentes, a precisão e desempenho do modelo poderão ficar condicionados ao grau de exigência utilizado na definição destas variáveis. Apesar da construção de RNA requerer formação específica, a sua utilização não o exige, ao contrário dos programas adaptados à modelação matemática. As RNA precisam apenas de registos de treino que poderão não incluir essa informação específica porque os próprios registos e respectivas variações já incorporam os efeitos dessas variáveis e que facilmente são reproduzidos pela RNA.

Pelos motivos apresentados conclui-se, de acordo com os dados apresentados e as simulações realizadas, que a utilização de RNA como emulador destes modelos hidrodinâmicos e de qualidade da água é adequada, apresentado um erro aceitável comparativamente com os benefícios associados à sua utilização. Este tipo de modelo apresenta características adequadas para ser integrado em algoritmos de optimização aplicados na resolução de problemas de gestão de recursos hídricos.





**CAPÍTULO**

**6**

**BIBLIOGRAFIA**

*O valor de um homem é apenas tão elevado como o  
valor das suas ambições.*

Aurélio, Marco

## 6 BIBLIOGRAFIA

**Araújo, José M. S.** (2006). *Relatório de Estágio de Admissão à Ordem dos Engenheiros. Ordem dos Engenheiros*. Porto.

**Araújo, José M. S.;** Pinho, José L. S.; Vieira, José M. P.; Pinho, Rui P. (2007a). *Interfaces Web para modelos Hidrodinâmicos 1DH e 2DH*. Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia/ Congresso Ibero Latino-Americano sobre Métodos Computacionais em Engenharia. Porto, 13 a 15 de Junho.

**Araújo, José M. S.;** Pinho, José L. S.; Vieira; José M. P.(2008a). *Modelação do balanço hídrico em albufeiras utilizando o programa Sobek*. Actas do X Congresso Nacional da Água. Cascais, Julho.

**Araújo, José M. S.;** Pinho; José L. S.; Vieira, José M. P.; Pinho, Rui (2008b). *Plataforma Web de Suporte ao Sistema de Modelação da Rede Hidrográfica da Bacia do Rio Cávado*. Revista de Engenharia Civil – Universidade do Minho.

**Araújo, José M. S.;** Pinho; José L. S.; Vieira, José M. P.; Pinho, Rui; Ribeiro, Andrea (2007b). *Diagnóstico actual e previsão da qualidade da água da bacia do rio Cávado através de modelação matemática*. Águas do Cávado.

Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos - APRH (2007). *Glossário das zonas costeiras – Directiva Quadro da Águas*. <http://www.aprh.pt/rgci/glossario/DQA.html#>.

Cartaxo, L. *et al.* (1985). *Determinação das Cargas Poluidoras Brutas Produzidas pelos Sectores de Actividade Industrial em Portugal Continental*. Direcção Geral dos Recursos e Aproveitamentos hidráulicos.

Cortez, Paulo; Neves, José (2000). *Redes Neurais Artificiais*. Universidade do Minho.

Decreto-Lei nº152/97, de 19 de Junho. Diário da República n.º139/97 – I Série A. Ministério do Ambiente. Lisboa.

Delft Hydraulics (2005). *SOBEK – Reference Manual*. Holanda.

Demuth, Howard B.; Beale, Mark H.; Hagan, Martin T. (2010). *Neural Network Toolbox 7 - User's Guide*. The Mathworks.

Directiva n.º 2000/60/CE Do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de Outubro de 2000. *Jornal Oficial das Comunidades Europeias* n.º L 327 de 22/12/2000 p. 0001 - 0073.

Eça, Ana R.G.P. (2007). *Avaliação de Cargas Poluentes à escala de bacia hidrográfica. O caso da bacia do rio Guadiana. Tese de Mestrado. Universidade do Minho.*

Fletcher, D.; Goss, E. (1993). *Forecasting With Neural Networks: an application using bankruptcy data*. Information & Management Vol.24, 3ª Edição, Pág.159-167.

França, José A. de; França, Maria B. de M.; Koyama, Marcela H.; Silva, Tiago P. da (2009). *Uma implementação do algoritmo Levenberg-Marquardt dividido para aplicações em visão computacional*. Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas.

Gavin, Henri (2010). *The Levenberg-Marquardt method for nonlinear least squares curve-fitting problems*. Department of Civil and Environmental Engineering Duke University.

Inventário Nacional de Sistemas de Abastecimento de Água e de Águas Residuais (2009). <http://insaar.inag.pt/>.

Lei n.º 58 de 29 de Dezembro. *Aprova a Lei da Água, transpondo para a ordem jurídica nacional a Directiva n.º 2000/60/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de Outubro, e estabelecendo as bases e o quadro institucional para a gestão sustentável das águas*. Diário da República n.º249/05 - I Série A.. Assembleia da República. Lisboa.

Levenberg-Marquardt algorithm – Definition (2011).

[http://www.wordiq.com/definition/Levenberg-Marquardt\\_algorithm](http://www.wordiq.com/definition/Levenberg-Marquardt_algorithm), 2011-04-13.

McCulloch, W. S.; Pitts, W. H. (1943). *A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity*. Bulletin of Mathematical Biophysics, 5:115-133.

Moreira, Miguel Ângelo (1997). *Introdução às redes neuronais artificiais - Publicações Pedagógicas*. Instituto Politécnico de Setúbal.

Pinho, J.L.S. (2000). *Aplicação de modelação matemática ao estudo da hidrodinâmica e da qualidade da água em zonas costeiras*. Tese de Doutoramento. Universidade do Minho.

Pinho; José L. S.; Vieira, José M. P. (2006). *Aspectos da aplicação do Delft Hydraulic's Sobek no desenvolvimento de um sistema de gestão operacional da água em Alqueva*. Universidade do Minho.

Plano de Bacia Hidrográfica do rio Lis (1999). Ministério do ambiente e do Ordenamento do Território.

Plano de Bacia Hidrográfica do rio Sado (1999). Ministério do ambiente e do Ordenamento do Território.

Plano de Bacia Hidrográfica do rio Vouga (1999). Ministério do ambiente e do Ordenamento do Território.

Quintela, António de C.; Portela, Maria M. *A modelação hidrológica em Portugal nos últimos 25 anos do século XX, nas perspectivas determinística, probabilística e estocástica*. Instituto Superior Técnico, Departamento de Engenharia Civil.

Shi, Jonathan J. (2000). *Reducing prediction error by transforming input data for neural networks*. Journal of Computing in Civil Engineering Vol.14, 2ª Edição , Pág.109–116.

Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (2008). <http://snirh.pt/>.

Vieira, J.M.P. (1986). *Aplicação de Modelos Matemáticos na Gestão da Qualidade de Águas Superficiais*. Tese de Doutoramento. Universidade do Minho.

**CAPÍTULO**

**A**

**ANEXOS**

*O homem é aquilo que ele próprio faz.*

Malraux, André

## ANEXOS

### A.1 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS DA RNA EM MATLAB

Iniciou-se o processo de definição de parâmetros pela determinação do número óptimo de neurónios. Para avaliar a sua importância e na tentativa de determinar o seu número ideal para a construção das redes associadas a este trabalho, utilizou-se o conjunto de dados resultantes da rede de monitorização na Bacia Hidrográfica do rio Cávado e cuja selecção foi já apresentada. Esta avaliação será feita utilizando, como dados de entrada, a precipitação e, como dados de saída, o caudal médio diário, verificados na Bacia do rio Cávado, utilizando registos de estações seleccionadas.

Na tentativa de encontrar o número ideal de neurónios para uma rede com apenas duas variáveis, uma de entrada e outra de saída, utilizou-se um processo iterativo iniciado com apenas um neurónio, seguido de dois neurónios e um incremento de cinco desde a rede com cinco neurónios até a um número de vinte e cinco. Seguidamente, foi testada uma rede com cinquenta neurónios e um incremento de cinquenta até um número de quinhentos. O Quadro A.1 apresenta um resumo dos testes realizados e respectivo número de neurónios.

Quadro A.1 – Resumo do número de neurónios utilizados

TESTE N.º	N.º DE NEURÓNIOS
TESTE1	1
TESTE2	2
TESTE3	5
TESTE4	10
TESTE5	15
TESTE6	20
TESTE7	25
TESTE8	50
TESTE9	100
TESTE10	150
TESTE11	200
TESTE12	250
TESTE13	300
TESTE14	350
TESTE15	400
TESTE16	450
TESTE17	500

A ferramenta do Matlab utilizada, *nntool*, permite a selecção de um conjunto de parâmetros que determinam o funcionamento da rede. Para não criar entropia na avaliação do número de neurónios, estes parâmetros mantiveram-se inalterados em todos os testes, apresentando os valores pré-definidos pelo programa. A sua influência será determinada mais à frente neste trabalho.

Após a criação e respectiva simulação das RNA com os pressupostos descritos, resultaram os erros apresentados no Quadro A.2. Para facilitar a avaliação do erro no programa Microsoft Excel, utilizou-se o coeficiente de correlação. Embora tivesse sido possível continuar com os mínimos quadrados, a avaliação do erro enquanto valor absoluto não é o principal objectivo destas verificações, interessando apenas a comparação do desempenho entre iterações. Por isso, esta alteração de método não provocará entropia aos objectivos propostos. O erro será, por isso, tanto menor quanto mais próximo estiver de um.

Quadro A.2 – Resumo dos erros (coeficiente de correlação)

TESTE N.º	N.º DE NEURÓNIOS	COEF. CORRELAÇÃO
TESTE1	1	0,7858
TESTE2	2	0,7791
<b>TESTE3</b>	<b>5</b>	<b>0,7913</b>
TESTE4	10	0,7633
TESTE5	15	0,2754
TESTE6	20	0,1484
TESTE7	25	0,6565
TESTE8	50	0,3943
TESTE9	100	0,7152
TESTE10	150	0,0483
<b>TESTE11</b>	<b>200</b>	<b>0,8548</b>
TESTE12	250	0,4945
TESTE13	300	0,4308
TESTE14	350	0,2436
TESTE15	400	0,3028
TESTE16	450	0,7211
TESTE17	500	0,1913

Na interpretação do quadro acima apresentado, verificação que o Teste 11 apresenta um desempenho superior, comparativamente aos restantes, seguido do Teste 3.



A Figura A.1 representa a comparação entre os valores registados e aos quais se referem as RNA criadas, e as duas séries resultantes das simulações das RNA e que apresentaram melhores desempenhos.

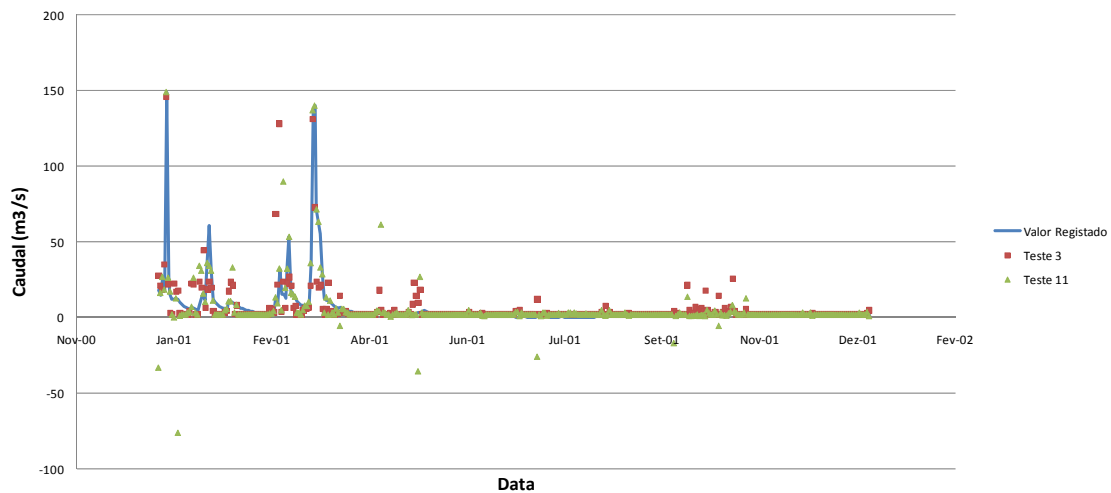


Figura A.1 - Séries de caudal registado e resultantes das RNA

Ainda que o Teste 11 tenha um coeficiente de correlação mais próximo de um do que o Teste 3, é possível verificar a existência de resultados fora do domínio apresentado pela série de valores registados, apesar desse melhor coeficiente de correlação. Esse fenómeno é evidenciado pela existência de alguns valores negativos na série simulada. Será, por isso, mais indicado aceitar o Teste 3 como o melhor da série.

Devido aos incrementos utilizados e pelo facto de o número ideal de neurónios, para esta rede e no teste anterior, se situar em cinco, procedeu-se ainda a simulações de redes com os mesmos parâmetros mas com um número sequencial inteiro de neurónios entre três e nove.

O Quadro A.3 inclui os coeficientes de correlação resultantes das séries simuladas e a Figura demonstra-as graficamente.

Quadro A.3 – Resumo dos erros (coeficiente de correlação)

TESTE N.º	N.º DE NEURÓNIOS	COEF. CORRELAÇÃO
TESTE18	3	0,6749
TESTE19	4	0,7584
TESTE20	6	0,7415
TESTE21	7	0,4861
<b>TESTE22</b>	<b>8</b>	<b>0,7676</b>
TESTE23	9	-0,3853

A Figura A.2 apresenta a comparação entre os resultados obtidos e os valores reais de monitorização para o caudal.

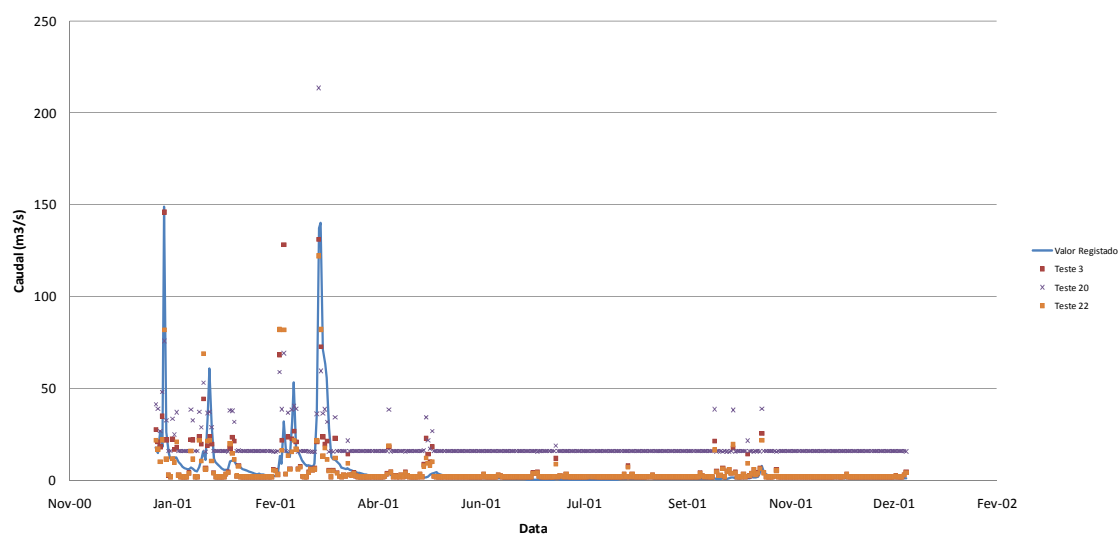


Figura A.2 - Séries de caudal registrado e resultantes das RNA

Nesta última verificação, o Teste 3 manteve-se com o melhor desempenho com um coeficiente de correlação de 0,79, superior a 0,77 do Teste 22.

Importa ainda referir que, nesta fase de avaliação de parâmetros e metodologias para criação de RNA, este método foi um processo expedito e que permitiu incorporar alguma sensibilidade relativamente à difícil tarefa de determinação de um valor para o número de neurónios. Ainda que se possa revelar adequado a esta fase, este método não é prático, não é científico e a sua determinação é iterativa, o que poderá, em fases críticas do trabalho, constituir uma fonte de incorrecção nos resultados. Por essa razão, realizou-se uma pesquisa, já referida, com o objectivo de encontrar uma

metodologia já utilizada noutros estudos e que permitisse, ainda que não um valor definitivo e conclusivo, mas uma aproximação inicial e este parâmetro que varia de rede para rede. Segundo a sugestão de Fletcher e Goss (1993), o número apropriado de nós numa RNA varia entre os limites definidos pelas equações 13 e 14, apresentadas anteriormente. Este, como referido, é um valor indicativo e nem sempre poderá corresponder ao intervalo com melhores resultados. Por essa razão, e cumulativamente ao uso das fórmulas, o intervalo do número de neurónios a utilizar foi sempre alargado relativamente ao sugerido pelas fórmulas.

Após a determinação do número óptimo de neurónios (cinco), por ter apresentado melhor desempenho em testes anteriores, para a séries de valores de entrada e saída introduzidas, foi iniciada a avaliação dos restantes parâmetros de uma RNA e que, embora não seja possível altera-los na ferramenta nntool, é possível determinar a sua influência no resultado final e estimar quais as opções mais indicadas para utilização deste tipo de séries de valores. O Quadro A.4 resume as simulações realizadas e os respectivos parâmetros seleccionados.

Quadro A.4 – Resumo dos parâmetros disponíveis simulados

TESTE N.º	APRENDIZAGEM	ERRO	FUNÇÃO ACTIVAÇÃO
TESTE24	LEARNGDM	MSEREG	TANSIG
TESTE25	LEARNGDM	SSE	TANSIG
TESTE26	LEARNGDM	MSE	LOGSIG
TESTE27	LEARNGDM	MSE	PURELIN
TESTE28	LEARNGD	MSE	TANSIG

Nos Testes 24 e 25, o método de aprendizagem e a função de activação foram mantidos de acordo com a opção por defeito do programa, LEARNGDM e TANSIG, respectivamente. Neste grupo de simulações apenas foi alterado o método de cálculo do erro para MSEREG e SSE. Importa ainda referir que o desempenho destas simulações foi avaliado comparativamente com a simulação com melhor desempenho nos testes anteriores (Teste 3) e cujos parâmetros foram definidos por defeito, com excepção do número de neurónios.

O método MSEREG para avaliação do desempenho é uma modificação aos Mínimos Quadrados e que consiste na soma deste com os Mínimos Quadrados dos Pesos e Erro Sistemático da função. O SSE é a soma do Quadrado dos Erros.

O desempenho, para além da função de activação Tangente Hiperbólica (TANSIG), foi igualmente testado para as funções Logística (LOGSIG) e Linear (PURELIN), nos testes 26 e 27, respectivamente.

Para completar o ciclo de avaliações de parâmetros, apenas seria necessário fazer uma comparação entre os métodos de aprendizagem disponíveis, Gradiente com Momento (LEARNGDM) e Gradiente (LEARNGD). Os resultados, expressos pelo Coeficiente de Correlação, encontram-se no Quadro A.5.

Quadro A.5 – Resumo dos parâmetros disponíveis simulados

TESTE N.º	COEF. CORRELAÇÃO
<b>TESTE3</b>	<b>0,7913</b>
TESTE24	0,5241
TESTE25	0,6859
TESTE26	0,7141
TESTE27	0,7809
TESTE28	0,6162

Da comparação do desempenho entre os diferentes testes, o número 3, com os parâmetros por defeito, apresenta um coeficiente de correlação mais próximo de um. Serão, por essa razão, aqueles (Teste 3) parâmetros a utilizar nas RNA a desenvolver, na utilização da ferramenta *nntool*. Importa ainda acrescentar que também a ferramenta simplificada *nftool* utiliza os mesmos parâmetros.

## A.2 AVALIAÇÃO DA TRANSFORMAÇÃO DE SÉRIES DE VALORES

Para a avaliação desta informação, foi realizada uma nova simulação com o objectivo de determinar a influência desta transformação de dados nos resultados já verificados, de acordo com os parâmetros seleccionados. Obteve-se, após a transformação, um coeficiente de correlação de 0,7959, superior ao coeficiente 0,7913 do Teste 3. Embora

a diferença não tivesse sido significativa, optou-se pela utilização deste procedimento em todas as RNA subsequentes. A representação gráfica dos resultados encontra-se na Figura A.3. De notar que, para efeitos de comparação entre dois resultados distintos, a transformação do Teste 3 foi realizada após o treino e respectiva simulação da RNA. Para o Teste 29, a RNA foi treinada após a transformação de dados. Só desta forma foi possível a comparação de duas séries de resultados distintas.

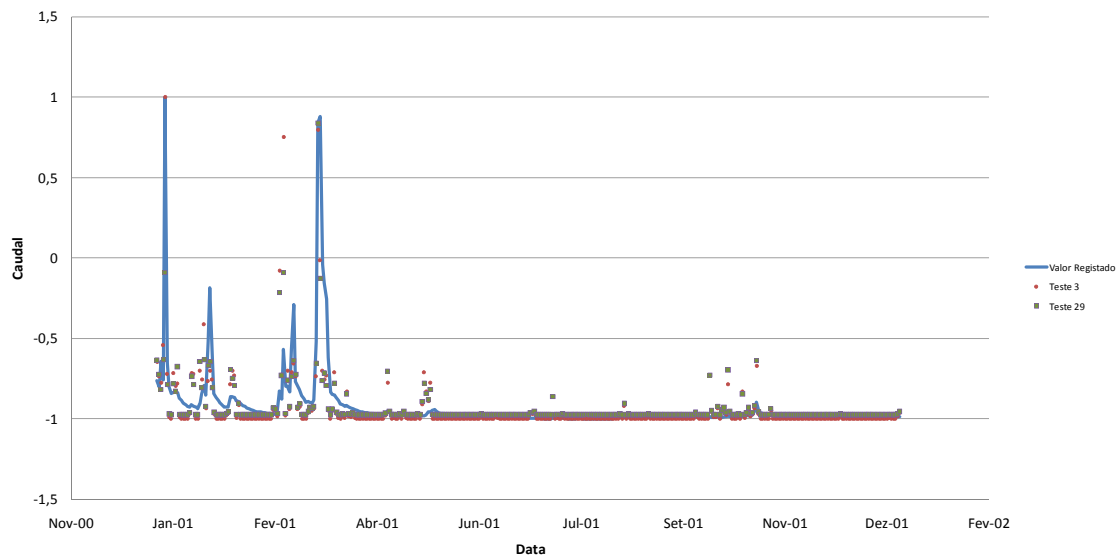


Figura A.3 - Gráfico comparativo de simulações com transformação de dados