UNIVERSIDADE DE TRÁS-OS-MONTES E ALTO DOURO

AVALIAÇÃO DE LEITOS DE MACRÓFITAS NO TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS DOMÉSTICAS EM PORTUGAL: SISTEMAS DE FLUXO SUB-SUPERFICIAL HORIZONTAL

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM
TECNOLOGIA AMBIENTAL

MARIA TERESA DUARTE HENRIQUES CANAIS SECO

Vila Real, 2008

AVALIAÇÃO DE LEITOS DE MACRÓFITAS NO TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS DOMÉSTICAS EM PORTUGAL: SISTEMAS DE FLUXO SUB-SUPERFICIAL HORIZONTAL

Maria Teresa Duarte Henriques Canais Seco

Dissertação submetida à Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro para obtenção do grau de Mestre em Tecnologia Ambiental

Orientadora:

Prof. Doutora Isabel Maria da Assunção de Marta Oliveira Bentes

Co-Orientador:

Prof. Doutor José Alcides Silvestre Peres

Vila Real, 2008

Dissertação elaborada para a obtenção do grau de Mestre em Tecnologia Ambiental, de acordo com o disposto no D.L. nº. 216/92, de 13 de Outubro de 1992.

RESUMO

As unidades de tratamento de águas residuais convencionais apresentam custos *per capita* muito elevados quando aplicadas a pequenos aglomerados populacionais, devido essencialmente aos custos de investimento e aos custos de manutenção, operação e exploração. A tecnologia de tratamento de águas residuais domésticas através de leitos de macrófitas apresenta custos de instalação e de manutenção reduzidos, requisitos energéticos baixos, um enquadramento paisagístico adequado, uma boa eficiência e uma produção reduzida de lamas, sendo uma solução de tratamento sustentável. O facto de necessitar de áreas mais extensas que os sistemas convencionais não é à partida problemático porque, no meio rural, onde geralmente se situam os pequenos aglomerados, a disponibilidade de terreno para implementação destas infra-estruturas é geralmente grande.

Nos leitos de macrófitas, a remoção dos compostos orgânicos biodegradáveis e recalcitrantes ocorre em resultado de complexas interacções de natureza química, física e biológica. A capacidade de tratamento por plantas macrófitas aquáticas deve-se, na sua essência, a três mecanismos: assimilação directa dos compostos orgânicos contaminantes e subsequente acumulação de metabolitos não fitotóxicos dentro dos seus tecidos, libertação de compostos que estimulam a actividade microbiana e as transformações bioquímicas e, por fim, o aumento da degradação aeróbia na rizosfera devido ao transporte de oxigénio, através do sistema vascular das plantas para junto da zona radicular.

No presente trabalho apresentam-se os principais critérios e métodos de dimensionamento, propostos por diferentes autores, para os leitos de macrófitas de fluxo sub-superficial horizontal. Para além disso, baseados no levantamento de um conjunto de leitos de macrófitas actualmente em funcionamento em Portugal, apresenta-se a superfície média *per capita* do leito utilizada nas referidas unidades de tratamento, bem como os custos *per capita* de instalação e custos/m^2 de leito. Avalia-se também o desempenho dos leitos estudados a partir dos resultados obtidos na monitorização dos efluentes dos diferentes parâmetros físico-químicos, adoptando, como referência, a legislação em vigor para descarga de águas residuais. É feito ainda o levantamento dos principais problemas práticos observados, propondo soluções correctivas ou mitigantes.

Palavras-chave: Tratamento de águas residuais, leitos de macrófitas, pequenos aglomerados rurais, dimensionamento.

ABSTRACT

When applied to small communities, the conventional wastewater treatment units have a very high cost per capita mostly due to investment costs and maintenance, operation and exploration. Domestic wastewater treatment technology through constructed wetlands present small installation and maintenance costs, low energetic requirements, a suitable landscape framing, good efficiency and a reduced sludge production, thus being a sustainable treatment solution. The need for more extensive areas than the conventional systems is not a problem to begin with, as in rural environments, where the small communities are generally located, land availability for the implementation of these kinds of infra-structures, is usually big.

In constructed wetlands the removal of organic biodegradable compounds and recalcitrants occurs as a result of complex chemical, physical and biological interactions. The aquatic macrophyte plants treatment ability is due, in essence, to three mechanisms: direct assimilation of pollutant organic compounds and subsequent accumulation of non phytotoxic metabolites inside their tissues, release of compounds who stimulate microbial activity and biochemical transformations and, finally, the increase of aerobic degradation in rhizosphera due to oxygen transport, through plants vascular system to the root zone.

The following work presents the principal criteria and proposed design methods, by different authors, for horizontal subsurface constructed wetlands. Also, based on a survey of a group of constructed wetlands in operation today in Portugal, it's presented the average surface per capita of the layer used in the treatment units referred, as well as the costs per capita of installation and costs/m^2 of layer. In addition, the performance of the studied layers is evaluated, through the analysis of the results obtained in monitoring several physical–chemical parameters from effluents, adopting as reference, the current legislation for wastewater discharges. Finally a survey of the principal practical problems observed is made, proposing corrective or mitigating solutions.

Key-Words: Wastewater treatment, constructed wetlands, small rural communities, design.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho teve como objectivo a obtenção do grau de Mestre em Tecnologia Ambiental, na Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, sob a orientação dos Professores Doutores Isabel Maria da Assunção de Marta Oliveira Bentes e José Alcides Silvestre Peres. Em breves palavras gostaria de agradecer a todas as pessoas que tornaram possível a sua concretização.

Agradeço à orientadora, Professora Doutora **Isabel Maria da Assunção de Marta Oliveira Bentes** e ao co-orientador, Professor Doutor **José Alcides Silvestre Peres**, a disponibilidade, o entusiasmo, boa disposição e partilha dos seus conhecimentos, que foram decisivos para a realização desta dissertação de mestrado. Agradeço ainda, terem aceitado esta tarefa, pela revisão dos diversos esboços deste trabalho, e pela amizade demonstrada.

Agradeço a colaboração da minha amiga **Wendy Malvar**, do **David Freitas** e do Engº **Paulo Guerra**, no enorme apoio informático prestado.

Agradeço a todas as Câmaras Municipais e Empresas Gestoras que tornaram possível a concretização deste trabalho, designadamente aos respectivos Serviços Técnicos, que possibilitaram as entrevistas realizadas, procederam ao preenchimento do questionário e facultaram os dados relativos às análises das águas residuais, que passo a nomear:

Águas do Ave – Engª Diana Matos
Águas do Zêzere e Côa – Engº Miguel Borges
Câmara Municipal de Alcochete – Engª Cristina Caldas
Câmara Municipal de Arganil – Engª Carla Neves
Câmara Municipal de Carregal do Sal – Engª Sandrine Vicente Carreira
Câmara Municipal de Condeixa – Engª Maria Teresa Pinto
Câmara Municipal de Covilhã – Engª Cristina Carinhas
Câmara Municipal de Grândola – Engª Cristina Campos
Câmara Municipal de Mealhada – Engº António Pita
Câmara Municipal de Odemira – Engª Lenya Silva
Câmara Municipal de Penacova – Engº Albertino Santos
Câmara Municipal de Santa Comba Dão – Engª Sandra Silva
Câmara Municipal de Tondela – Engª Maria João Fernandes
Câmara Municipal de Vila de Rei – Engª Patrícia Silvério
Direcção Regional de Saneamento Básico da Região Autónoma da Madeira – Engª Lucília Araújo e Dr. João Aveiro

Agradeço ao Sr. Presidente da Câmara Municipal de Celorico de Basto, Dr. **Albertino Teixeira da Mota e Silva**, pela sua sensibilidade e perspicácia ao orientar a minha vida profissional na direcção do Ambiente, e pela amabilidade demonstrada ao facilitar as dispensas laborais para elaboração deste trabalho.

Agradeço também aos restantes membros políticos do Município de Celorico de Basto, na qualidade do Assessor do Ambiente com quem trabalho directamente, Sr. **Marinho Gomes**, e dos Vereadores Engº **Inácio Silva** e Dr. **Joaquim Mota e Silva**, pela paciência e compreensão durante as minhas ausências.

Agradeço à **Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro** pela magnífica instituição que é, proporcionando aos seus alunos acolhimento, conhecimento e bem-estar.

Agradeço ao coordenador do mestrado em Tecnologia Ambiental, Professor Doutor **Fontaínhas Fernandes** pelo módulo leccionado em que tanto aprendi, pela sua boa disposição, simpatia, disponibilidade e dinamismo.

Agradeço aos meus colegas da UTAD, principalmente aos do meu grupo (**Ana Guapo, Carla Alves, José Alexandre Pinho e José Carvalho**), que sempre me incentivaram a fazer este trabalho e a não desistir dele quando as forças começavam a faltar.

À minha **mãe,** pelo carinho e educação que sempre fez questão de me proporcionar e pela força que me deu em todas as alturas que decidi executar um projecto.

Ao **Hélder,** pelo encorajamento, carinho, compreensão, muita colaboração demonstrada durante a elaboração deste trabalho e pela convicção que me incutiu ao acreditar que seria possível terminar esta tarefa com sucesso.

Ao meu filho, **Dinis**, que foi gerado e nasceu (crescendo também um bocadinho) durante a execução deste trabalho, que muito me ajudou (dormindo bem de noite) e me deu forças para não desistir.

A todos, sem os quais não teria sido possível realizar e concluir a dissertação de mestrado, o meu muito obrigado.

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ALR	Taxa de remoção por unidade de área
APRH	Associação Portuguesa de Recursos Hídricos
A_s	Área superficial
A_t	Área da secção transversal
b	Largura
C_a	Concentração de CBO_5 do afluente
C_e	Concentração de CBO_5 do efluente
CBO_5	Carência Bioquímica de Oxigénio aos 5 dias
CCRC	Comissão de Coordenação da Região Centro
CCDR	Comissão de Coordenação de Desenvolvimento Regional
CQO	Carência Química de Oxigénio
EPA	Environmental Protection Agency
ETAR	Estação de Tratamento de Águas Residuais
EUA	Estados Unidos da América
h	Profundidade
IST	Instituto Superior Técnico
J	Gradiente hidráulico ou perda de carga
K	Condutividade hidráulica
K_T	Constante de reacção de 1ª ordem
K_{20}	Constante de reacção de 1ª ordem a 20ºC
L	Comprimento
m	Percentagem que quantifica a perda de carga
n	Porosidade
PEAASAR	Plano Estratégico de Abastecimento de Água e Saneamento de Águas Residuais
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
Q	Caudal
SST	Sólidos Suspensos Totais
t	Tempo de retenção hidráulica
T	Temperatura
UC	Universidade de Coimbra
UTAD	Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro
v	Velocidade de escoamento
V	Volume
VLE	Valor Limite de Emissão

ÍNDICE GERAL

RESUMO ..... **I**

ABSTRACT ..... **III**

AGRADECIMENTOS ..... **V**

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS ..... **VII**

1 – INTRODUÇÃO E OBJECTIVOS **1**

2 – TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS ATRAVÉS DE LEITOS DE MACRÓFITAS **5**

2.1 – NOTA HISTÓRICA **5**
2.2 – CONSTITUIÇÃO DOS SISTEMAS DE TRATAMENTO UTILIZANDO LEITOS DE MACRÓFITAS **6**
2.3 – TIPOS DE LEITOS DE MACRÓFITAS **7**
2.3.1 – Sistema de macrófitas aquáticas flutuantes 7
2.3.2 – Sistema de macrófitas submersas 8
2.3.3 – Sistema de macrófitas aquáticas emergentes 8
2.3.3.1 – Sistema de macrófitas aquáticas emergentes de fluxo superficial 9
2.3.3.2 – Sistema de macrófitas aquáticas emergentes de fluxo sub-superficial horizontal 9
2.3.3.3 – Sistema de macrófitas aquáticas emergentes de fluxo sub-superficial vertical 10
2.4 – FUNCIONAMENTO DOS LEITOS DE MACRÓFITAS **11**

3 – SISTEMA DE MACRÓFITAS DE FLUXO SUB-SUPERFICIAL HORIZONTAL **13**

3.1 – DESCRIÇÃO DO SISTEMA **13**
3.2 – TRATAMENTO FÍSICO-QUÍMICO E BIOLÓGICO **16**
3.3 – EFICIÊNCIA DO TRATAMENTO **19**
3.4 – TIPOS DE PLANTAS MAIS COMUNS **21**
3.4.1 – *Iris* (lírio amarelo dos pântanos) 23
3.4.2 – *Juncus* (junco) 24
3.4.3 – *Phragmites* (caniço) 25
3.4.4 – *Scirpus* 26
3.4.5 – *Typha* (espadana) 27
3.5 – ASPECTOS CONSTRUTIVOS **28**
3.6 – MANUTENÇÃO E OPERAÇÃO **29**
3.6.1 – Órgãos de pré-tratamento 29
3.6.2 – Leitos das macrófitas 30
3.7 – VANTAGENS DOS LEITOS DE MACRÓFITAS **32**
3.8 – LIMITAÇÕES DA APLICAÇÃO DOS LEITOS DE MACRÓFITAS **33**

4 – DIMENSIONAMENTO **35**

4.1 – INTRODUÇÃO **35**
4.2 – PRINCÍPIOS BÁSICOS **36**
4.2.1 – Cinética de remoção de matéria orgânica 36
4.2.2 – Escoamento em meios porosos 38
4.3 – MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO PARA A REMOÇÃO DE CBO_5 ..... **40**

4.3.1 – Método empírico 40
4.3.2 – Método proposto por Reed, Crites e Middlebrooks 40
4.3.3 – Método proposto por Metcalf & Eddy 41
4.3.4 – Método proposto por Relvão 42
4.3.5 – Método proposto pela EPA (Environmental Protection Agency) 43
4.4. – APLICAÇÃO PRÁTICA 45
4.4.1 – Método Empírico 45
4.4.2 – Método proposto por Reed, Crites e Middlebrooks 45
4.4.3 – Metcalf & Eddy 46
4.4.4 – Relvão 47
4.4.5 – EPA 48
4.4.6 – Comparação dos métodos apresentados 49

5 – CASOS DE ESTUDO 51

5.1 - INTRODUÇÃO 51
5.2 – CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS 53
5.2.1 – Sistema da Madeira (ETAR de Boaventura) 53
5.2.2 – Sistema de Alcochete (ETAR de Barroca d' Alva) 58
5.2.3 – Sistema de Aranhas – Castelo Branco 60
5.2.4 – Sistema de Condeixa (ETAR de Anobra) 63
5.2.5 – Sistema da Guarda (ETAR de Gonçalo) 65
5.2.6 – Sistema de Penacova (ETAR de S. Pedro d' Alva) 69
5.2.7 – Sistema de Rossas – Vieira do Minho 71
5.2.8 – Sistema de Salamonde 2 – Vieira do Minho 74
5.2.9 – Sistema de Salvador – Penamacor 77
5.2.10 – Sistema de Vila de Rei (ETAR do Penedo) 79
5.3 – ANÁLISE DOS CASOS DE ESTUDO 81
5.3.1 – Análise das características das águas residuais brutas 81
5.3.2 – Análise do desempenho dos sistemas 83
5.4 – SÍNTESE DOS INQUÉRITOS ÀS ETAR'S E DISCUSSÃO DE RESULTADOS 86
5.5 – PRINCIPAIS PROBLEMAS OBSERVADOS 92
5.6 – ACÇÕES PREVENTIVAS 92
5.7 – ACÇÕES CORRECTIVAS 93
5.7.1 – Colmatação do leito 93
5.7.2 – Colmatação das tubagens 94
5.7.3 – Incumprimento dos requisitos legais de descarga 94
5.7.4 – Desenvolvimento das plantas 94

6 – CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO 95

BIBLIOGRAFIA 99

ANEXO 1 107

ANEXO 2 109

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esquema dos tipos de leitos de macrófitas 7
Figura 2. 2 – Sistema de macrófitas aquáticas flutuantes (Dias, 2000)..... 8
Figura 2.3 – Sistema de macrófitas aquáticas submersas (Dias, 2000)..... 8
Figura 2.4 – Sistema de macrófitas aquáticas emergentes de fluxo superficial horizontal. (Vymazal, 2003) 9
Figura 2.5 – Sistema de macrófitas aquáticas emergentes de fluxo sub-superficial horizontal. (Dias, 2000)..... 10
Figura 2.6 – Sistema de macrófitas aquáticas emergentes de fluxo sub-superficial vertical descendente (Vymazal, 2003)..... 10
Figura 2.7 – Sistema de macrófitas aquáticas emergentes de fluxo sub-superficial vertical ascendente (Vymazal, 2003)..... 11
Figura 2.8 – Esquema de um leito de macrófitas de fluxo sub-superficial - planta e corte (Relvão, 1999)..... 12
Figura 3.1 – Sistema de macrófitas aquáticas emergentes de fluxo sub-superficial horizontal (Dias, 2000)..... 13
Figura 3.2 – Base e taludes do leito de macrófitas impermeabilizado com tela de polietileno (Sistema da Covilhã, 2000) 14
Figura 3.3 – Camadas constituintes do leito (Sistema da Covilhã, 2000) 15
Figura 3.4 – Altura útil do leito de macrófitas (Relvão, 1999) 15
Figura 3.5 – Distribuição vertical das raízes e rizomas (Relvão, 1999)..... 16
Figura 3.6 – Esquema simplificado das condições de oxidação-redução, junto às raízes de macrófitas (Relvão 1999)..... 17
Figura 3.7 – Processos de depuração dos leitos de macrófitas 18
Figura 3.8 – Plantação de macrófitas (Sistema da Covilhã, 2000)..... 22
Figura 3.9 – *Íris pseudacorus* (UTAD, 2007) 24
Figura 3.10 – *Juncus* (UC, 2007)..... 25
Figura 3.11 – Leito constituído por *Phragmites* (Sistema de Salamonde, 2002)..... 25
Figura 3.12 – Scirpus lacustris (UC, 2007) 26
Figura 3.13 – *Typhas* (Sistema de Condeixa – 2003) 27
Figura 3.14 – Inundação do leito de macrófitas (Sistema de Condeixa – 2005) 29
Figura 3.15 – Caixa de visita à saída dos leitos de macrófitas e tubo de regulação 30
Figura 3.16 – Leito de macrófitas com algumas infestantes (Sistema da Covilhã, 2000) 31
Figura 4.1 - Esquema de leito de macrófitas 43
Figura 5.1 – Mapa de Portugal com a localização dos sistemas de leitos de macrófitas..... 52
Figura 5.2 – Esquema tipo de um sistema de leito de macrófitas 53
Figura 5.3 – Sistema de Boaventura – Madeira 54
Figura 5.4 – Evolução de CBO_5 (Madeira)..... 55
Figura 5.5 – Evolução de CQO (Madeira) 55
Figura 5.6 – Evolução de SST (Madeira)..... 57
Figura 5.7 – Sistema de leitos de macrófitas de Alcochete (2003)..... 58
Figura 5.8 – Evolução de CBO_5 (Alcochete) 59
FigurA 5.9 – Evolução de CQO (Alcochete) 59
Figura 5.10 – Evolução de SST (Alcochete)..... 59
Figura 5.11 – Evolução do Fósforo total (Alcochete)..... 60
Figura 5.12 – Evolução do Azoto total (Alcochete)..... 60
Figura 5.13 – Evolução de CBO_5 (Aranhas) 61
Figura 5.14 – Evolução de CQO (Aranhas) 61
Figura 5.15 – Evolução de SST (Aranhas) 62
Figura 5.16 – Evolução do Fósforo total (Aranhas)..... 63
Figura 5.17 – Evolução do Azoto total (Aranhas) 63
Figura 5.18 – Leito de macrófitas do sistema de Condeixa (2003) 63
Figura 5.19 – Evolução de CBO_5 (Condeixa)..... 64
Figura 5.20 – Evolução de CQO (Condeixa) 64
Figura 5.21 – Evolução de SST (Condeixa) 64
Figura 5.22 – Evolução do Fósforo total (Condeixa)..... 65
Figura 5.23 – Evolução do Azoto total (Condeixa)..... 66

Figura 5.24 – Evolução de CBO_5 (Guarda)……..67
Figura 5.25 – Evolução de CQO (Guarda) 67
Figura 5.26 – Evolução de SST (Guarda) 67
Figura 5.27 – Evolução do Fósforo total (Guarda)……..69
Figura 5.28 – Evolução do Azoto total (Guarda) 69
Figura 5.29 – Evolução de CBO_5 (Penacova)……..70
Figura 5.30 – Evolução de CQO (Penacova) 70
Figura 5.31 – Evolução de SST (Penacova) 70
Figura 5.32 – Evolução do Fósforo total (Penacova)……..71
Figura 5.33 – Evolução do Azoto total (Penacova) 71
Figura 5.34 – Evolução de CBO_5 (Rossas)……..72
Figura 5.35 – Evolução de CQO (Rossas) 72
Figura 5.36 – Evolução de SST (Rossas) 73
Figura 5.37 – Evolução do Fósforo total (Rossas)……..74
Figura 5.38 – Evolução do Azoto total (Rossas) 74
Figura 5.39 – Sistema de Salamonde 2 (2002) 74
Figura 5.40 – Evolução de CBO_5 (Salamonde 2)……75
Figura 5.41 – Evolução de CQO (Salamonde 2) 75
Figura 5.42 – Evolução de SST (Salamonde 2) 76
Figura 5.43 – Evolução do Fósforo total (Salamonde 2)……77
Figura 5.44 – Evolução do Azoto total (Salamonde 2) 77
Figura 5.45 – Evolução de CBO_5 (Salvador)……78
Figura 5.46 – Evolução de CQO (Salvador) 78
Figura 5.47 – Evolução de SST (Salvador) 78
Figura 5.48 – Evolução do Fósforo total (Salvador)……79
Figura 5.49 – Evolução do Azoto total (Salvador) 79
Figura 5.50 – Evolução de CBO_5 (Vila de Rei)……81
Figura 5.51 – Evolução de CQO (Vila de Rei) 81
Figura 5.52 – Evolução de SST (Vila de Rei) 81

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 – Valores limite de emissão (VLE) na descarga de águas residuais domésticas (D.L. 236/98) 20
Quadro 3.2 – Classificação de macrófitas (UTAD, 2007) 23
Quadro 3.3 – Tarefas a efectuar num leito de macrófitas (Guia da Comissão Europeia, 2001) 32
Quadro 4.1 – Coeficientes de permeabilidade relativos à água, em metros por segundo 38
Quadro 4.2 – Valores da condutividade para diferentes meios 41
Quadro 4.3 – Características típicas do meio dos leitos de macrófitas (EPA 625/1-88-0229) 42
Quadro 4.4 – Valores da constante K_{20} para vários meios e tempos de retenção 42
Quadro 4.5 – Valores de ALR 44
Quadro 4.6 – Enchimento do leito 45
Quadro 4.7 – Dados dos parâmetros do sistema a dimensionar 45
Quadro 4.8 – Dimensões dos leitos de macrófitas 50
Quadro 5.1 – Monitorização de CBO_5 do sistema da Madeira 54
Quadro 5.2 – Monitorização de CQO do sistema da Madeira 56
Quadro 5.3 – Monitorização de SST do sistema da Madeira 57
Quadro 5.4 – Parâmetros físico-químicos globais do sistema de Alcochete 59
Quadro 5.5 – Parâmetros físico-químicos do sistema de Alcochete 60
Quadro 5.6 – Parâmetros físico-químicos globais do sistema de Aranhas 61
Quadro 5.7 – Parâmetros físico-químicos do sistema de Aranhas 62
Quadro 5.8 – Parâmetros físico-químicos globais do sistema de Condeixa 64
Quadro 5.9 – Parâmetros físico-químicos do sistema de Condeixa 65
Quadro 5.10 – Parâmetros físico-químicos globais do sistema da Guarda 66
Quadro 5.11 – Parâmetros físico-químicos do sistema da Guarda 68
Quadro 5.12 – Parâmetros físico-químicos globais do sistema de Penacova 69
Quadro 5.13 – Parâmetros físico-químicos do sistema de Penacova 71
Quadro 5.14 – Parâmetros físico-químicos globais do sistema de Rossas 72
Quadro 5.15 – Parâmetros físico-químicos do sistema de Rossas 73
Quadro 5.16 – Parâmetros físico-químicos globais do sistema de Salamonde 2 75
Quadro 5.17 – Parâmetros físico-químicos do sistema de Salamonde 2 76
Quadro 5.18 – Parâmetros físico-químicos globais do sistema de Salvador 78
Quadro 5.19 – Parâmetros físico-químicos do sistema de Salvador 79
Quadro 5.20 – Parâmetros físico-químicos do sistema de Vila de Rei 80
Quadro 5.21 – Médias parciais dos parâmetros físico-químicos dos sistemas 82
Quadro 5.22 – Concentrações médias dos parâmetros físico-químicos analisados 82
Quadro 5.23 – Composição típica das águas residuais domésticas não tratadas (Metcalf & Eddy, 1998) 82
Quadro 5.24 – Médias de eficiência dos sistemas estudados 83
Quadro 5.25 – Percentagem de incumprimentos verificados 85
Quadro 5.26 – Síntese dos inquéritos realizados a 20 sistemas de leitos de macrófitas 87
Quadro 5.27 – Análise de áreas e dos custos de investimento dos sistemas de leitos de macrófitas 90

1 – INTRODUÇÃO E OBJECTIVOS

A água é um bem que tem de ser preservado, uma vez que a sua qualidade é afectada por diversos agentes poluentes e contaminantes. As águas residuais provenientes de aglomerados populacionais têm grande significado do ponto de vista de impacte ambiental, sobretudo pela carga orgânica e presença de microorganismos patogénicos. Assim, impõe-se uma acção geral e simultânea por parte das entidades públicas, privadas e dos cidadãos em geral, com vista à protecção das águas contra a poluição, adoptando soluções sustentáveis.

Para solucionar os problemas de degradação ambiental que têm surgido nos cursos de água, a Directiva 91/271/CEE foi transposta para o direito nacional através do Decreto Lei 152/97, de 15 de Julho, referente à recolha, ao tratamento e à descarga das águas residuais urbanas e ao tratamento e descarga das águas residuais de determinados sectores industriais. Depois do PEAASAR I (2000-2006) o 2º Plano Estratégico de Abastecimento de Água e Saneamento (PEAASAR II) tem como principal desafio, até 2013, ser possível servir 95% da população total do país com sistemas públicos de abastecimento de água e 90% com sistemas de saneamento e águas residuais. As projecções de 2006 apontavam para níveis de atendimento às populações situados na ordem dos 93% em abastecimento de água e de 80% em tratamento de águas residuais no final de 2008 (APRH, 2006).

Assim, torna-se necessário e urgente planear o tratamento das águas residuais, com vista a aumentar o nível de atendimento, aplicando tecnologias que permitam efectuar o tratamento de uma forma sustentável, mas cumprindo os valores exigidos no normativo nacional e comunitário.

Apesar de existirem inúmeras tecnologias de tratamento de águas residuais mais ou menos eficientes e económicas, adequadas aos grandes aglomerados, a sua utilização em pequenos aglomerados é inviabilizada pelos seus elevados custos *per capita*. Por este motivo, tem sido habitual nos pequenos aglomerados o uso de fossas sépticas como órgão de tratamento das águas residuais, normalmente complementado por um sistema de filtração e/ou infiltração. Este processo revela-se geralmente ineficaz, face às exigências legislativas actuais, pondo em causa a qualidade da água, muitas vezes utilizada como fonte de abastecimento para consumo humano e para actividades recreativas, entre outras.

Esta constatação aponta para que em pequenos aglomerados sejam utilizadas tecnologias simples, de baixo custo de instalação e de manutenção. Uma tecnologia de tratamento de águas residuais que se tem mostrado especialmente adequada para pequenos aglomerados é a dos leitos de macrófitas, pois para além dos baixos custos de instalação e manutenção, têm um perfeito enquadramento paisagístico, uma boa eficiência e é uma solução de tratamento sustentável. O facto de necessitar de extensas áreas de implantação não é à partida problemático, pois em meio rural, onde geralmente se situam os pequenos aglomerados, a disponibilidade de terreno é normalmente grande.

Em Portugal existe já uma quantidade significativa de sistemas que utilizam os leitos de macrófitas no tratamento de águas residuais domésticas. Em 2003 existiam 128 sistemas (Dias *et al,* 2003), e em 2006, a pedido do autor, as Comissões de Coordenação de Desenvolvimento Regional Centro, Alentejo e Algarve revelaram a existência de 143, 33 e 8 sistemas, respectivamente. Relativamente à zona Norte não foi possível obter dados sobre o número de sistemas existentes. Assim, atendendo ao considerável número destes sistemas, torna-se oportuno fazer uma avaliação do seu desempenho e funcionamento. Face a esta avaliação, se esta tecnologia se mostrar efectivamente eficiente e económica será de promover a sua maior aplicação, uma vez que no nosso país existe um grande número de pequenos aglomerados rurais, de povoamento disperso, onde se torna inviável a utilização de ETAR's convencionais.

Muitos destes sistemas não são devidamente monitorizados, não se conhecendo o seu desempenho, não obstante as exigências legislativas. Por outro lado, poucos estudos foram encontrados que analisassem a eficiência dos leitos de macrófitas em Portugal.

Deste modo, pensou-se que seria relevante analisar alguns sistemas em funcionamento, em Portugal, sendo a pesquisa efectuada a partir de elementos referentes a 20 sistemas de tratamento utilizando leitos de macrófitas, através da realização de inquéritos e entrevistas aos responsáveis desses sistemas, bem como da análise dos parâmetros físico-químicos resultantes da sua monitorização. O conhecimento das análises físico-químicas referentes aos sistemas analisados permitiu, ainda, fazer a caracterização das águas residuais domésticas de pequenos aglomerados, em Portugal, e a comparação com valores habitualmente considerados em dimensionamento e que são referidos em bibliografia.

Era ainda objectivo deste trabalho comparar o desempenho dos sistemas de acordo com o método de dimensionamento, os tipos de plantas utilizados e a localização geográfica dos sistemas. No entanto, a impossibilidade de obter os dados pretendidos, bem como um número mais significativo de informação, inviabilizou a concretização deste objectivo.

Por outro lado, a generalização desta tecnologia exige uma maior divulgação, junto dos projectistas, dos critérios de dimensionamento a utilizar, pelo que se introduziu neste trabalho um capítulo referente ao dimensionamento dos leitos de macrófitas de fluxo sub-superficial horizontal. Neste trabalho tratou-se, em particular, dos leitos de fluxo sub-superficial horizontal uma vez que são os mais utilizados em Portugal e apresentam vantagens sobre os restantes, nomeadamente, o facto de não necessitarem de energia eléctrica para a difusão da água residual pelo leito, não terem a água residual à superfície, o que evita a proliferação de mosquitos e a propagação de odores.

Assim, os principais objectivos deste trabalho são:

- Levantamento dos principais critérios de dimensionamento e dos métodos apresentados por alguns autores;

- Caracterização das águas residuais brutas provenientes de pequenos aglomerados;
- Avaliação do desempenho dos leitos de macrófitas baseada em análises físico-químicas de 10 sistemas em funcionamento em Portugal;
- Determinação das áreas *per capita*, ocupadas pelos sistemas de tratamento utilizando leitos de macrófitas de fluxo sub-superficial horizontal bem como das áreas *per capita* ocupadas pelo leito, a partir da análise de 20 sistemas em funcionamento em Portugal;
- Determinação dos custos de instalação associados à construção destes sistemas de tratamento;
- Levantamento dos principais problemas associados ao funcionamento dos leitos.

Para a concretização destes objectivos elaborou-se este trabalho que é constituído por 6 capítulos.

No capítulo 1, que é o presente, faz-se uma introdução ao tema em estudo e definem-se os objectivos a alcançar.

No capítulo 2 faz-se um resumo histórico da evolução dos sistemas de leitos de macrófitas em diversos países, a sua constituição, funcionamento e classificação em função da espécie botânica utilizada e tipo de escoamento.

O capítulo 3 descreve os leitos de macrófitas de fluxo sub-superficial horizontal, nomeadamente no que respeita aos mecanismos e eficiência do tratamento físico-químico e biológico, ao tipo de plantas, referindo aspectos construtivos, manutenção, operação, vantagens e limitações.

No capítulo 4 são apresentados os critérios de dimensionamento dos leitos de macrófitas, e alguns métodos propostos por vários autores. Apresenta-se ainda um exemplo de dimensionamento resolvido pelos diversos métodos.

O capítulo 5 caracteriza os sistemas em estudo. Essa caracterização foi efectuada através de entrevistas, inquéritos e análise dos dados fornecidos pelos boletins de monitorização do sistema (análises físico-químicas) e permitiu avaliar a eficiência dos sistemas, o seu desempenho, as áreas ocupadas, os custos e os principais problemas observados, propondo soluções correctivas ou mitigantes. Para além disso permitiu fazer a caracterização das águas residuais domésticas de pequenos aglomerados em Portugal.

No capítulo 6 apresentam-se as conclusões, os trabalhos futuros e sugestões baseadas nos resultados e na experiência adquirida ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Todo este estudo tem como suporte paralelo a legislação em vigor em Portugal (Anexo 1), que impõe medidas de controlo das cargas poluentes que se rejeitam no meio ambiente, tanto nas linhas de água como no solo.

2 – TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS ATRAVÉS DE LEITOS DE MACRÓFITAS

2.1 – Nota histórica

Os leitos de macrófitas podem designar-se por leitos húmidos construídos mas, desde sempre, existiram leitos húmidos naturais, muitas vezes usados para descarga de águas residuais. As zonas húmidas naturais começaram, há mais de 100 anos, a ser utilizadas como locais de descarga de efluentes nos EUA, e a experiência demonstrou uma elevada depuração desses efluentes (Kadlec, 2003).

Nos anos 50, iniciaram-se estudos sobre estes sistemas na Europa, e Seidel demonstrou a eficiência na remoção de compostos fenólicos e outros derivados tóxicos, através da utilização de determinadas plantas, como *Scirpus, Juncus* ou *Phragmites* (Harbel, 2003).

Nos anos 60, as investigações prosseguiram e Seidel desenvolveu um método que usava areia ou gravilha como substrato e a combinação dos fluxos vertical e horizontal. Kickuth, que também já tinha trabalhado com Seidel, desenvolveu o "método da zona radicular" baseado em fluxo horizontal e substrato tipo solo arenoso (Harbel, 2003).

Nos anos 70 os leitos húmidos começaram a surgir por todo o mundo. Para tal contribuiu o aumento do conhecimento dos processos naturais e a necessidade do tratamento das águas residuais em áreas de baixa densidade populacional onde era necessário reduzir custos. Nos Estados Unidos, foram feitas observações à capacidade de assimilação das zonas húmidas naturais que conduziram à experiência de diferentes desenhos/modelos para os leitos de macrófitas construídos (Brix, 1994). Os leitos de macrófitas permitiam optimizar os processos de tratamento, pois possibilitavam obter maior eficiência na remoção de sólidos em suspensão (SST), na redução da carência bioquímica de oxigénio (CBO), dos coliformes, das bactérias e do azoto (N) das águas residuais, quando comparados com os sistemas naturais (Alexandre, 2000). Os primeiros leitos de macrófitas para tratamento de águas residuais municipais foram construídos em 1974 por Kickuth, na Alemanha e na Holanda.

No início dos anos 80 esta tecnologia disseminou-se por muitos países Europeus interessados em sistemas de baixo custo e de pouca manutenção, para aglomerados populacionais até 1000 habitantes-equivalentes. Foi nesta década que os leitos de macrófitas começaram a ser tidos em consideração, devido à sua simplicidade de construção, grande capacidade absorvente, pequena produção de lamas, baixos custos de manutenção e de operação. O primeiro sistema construído na Inglaterra (Acle and St. Pauls Walden) entrou em funcionamento em 1985. Em 1988 cerca de 20 sistemas de fluxo horizontal estavam já em funcionamento e em 1998 existiam mais de 400 sistemas. Na Áustria, este tipo de sistemas foi amplamente utilizado em áreas rurais, em pequenos

aglomerados e em casas individuais. Além da Áustria, Dinamarca, França, Alemanha, Holanda e Inglaterra, os sistemas de leitos de macrófitas foram introduzidos na Suécia, Suíça, América do Norte e Austrália nos anos 80. Nos anos 90 muitos destes sistemas foram construídos noutros países da Europa (República Checa, Polónia, Noruega, Portugal e Eslovénia), África e Ásia (China e Índia) (Harbel, 2003).

Inicialmente a principal aplicação dos leitos de macrófitas foi no tratamento de águas residuais municipais mas, nos últimos 5 a 15 anos a sua aplicação foi estendida a efluentes pluviais, industriais e agrícolas. Hoje em dia, quase todos os tipos de águas residuais podem ser tratados por leitos de macrófitas. Este alargamento do domínio de aplicação conduziu a novos conceitos de tratamento por leitos de macrófitas, tais como os sistemas de fluxo vertical, os sistemas de carga intermitente, os sistemas de várias plataformas e os sistemas híbridos que são uma combinação de sistemas de leitos de macrófitas de escoamento horizontal e vertical.

Actualmente surge também uma outra aplicação das macrófitas, na construção de piscinas naturais, também conhecidas como piscinas biológicas, que na realidade são pequenos lagos ornamentais onde as plantas se desenvolvem e tratam a água através de processos semelhantes aos que serão descritos no capítulo 3 sobre tratamento das águas residuais. Normalmente, nestas piscinas são criadas duas zonas distintas, uma para as plantas e outra para recreação, principalmente com o objectivo das pessoas não danificarem as macrófitas (Ferreira, 2007).

Esta perspectiva histórica mostra o desenvolvimento da tecnologia dos leitos de macrófitas, que quando comparada com as tecnologias utilizadas nas ETAR's convencionais nomeadamente as lamas activadas e os leitos percoladores (com mais de um século de experiência), evidencia que os leitos de macrófitas ainda estão em franco desenvolvimento, como já foi referido.

2.2 – Constituição dos sistemas de tratamento utilizando leitos de macrófitas

Os sistemas de tratamento utilizando leitos de macrófitas são compostos por órgãos para tratamento preliminar, tratamento primário e tratamento secundário.

O órgão de tratamento preliminar é geralmente uma grelha para remover os sólidos em suspensão de maior dimensão, antes do efluente entrar no órgão de tratamento primário.

O tratamento primário é geralmente assegurado por uma fossa séptica ou por um tanque Imhof, onde são sedimentados grande parte dos sólidos em suspensão, flotadas as gorduras e outros materiais menos densos, e onde se dá a remoção duma pequena percentagem da matéria orgânica. Este órgão evita a colmatação sub-superficial do leito e reduz as concentrações de alguns poluentes (Tchobanoglous, 2003).

O tratamento secundário é assegurado por um ou mais leitos de macrófitas, muito semelhantes a um tanque, em que o seu enchimento (leito) pode ser natural ou artificial e onde são plantadas macrófitas que podem ser de diversas espécies. O material de enchimento serve de suporte à vegetação aí colocada e aos microorganismos funcionando ainda como um filtro. Podem efectuar níveis mais avançados de tratamento, em função do tipo de afluentes que recebem.

2.3 – Tipos de leitos de macrófitas

A classificação dos leitos de macrófitas, Figura 2.1, é baseada no tipo de plantas utilizadas: flutuantes, submersas e emergentes. No caso das plantas emergentes o leito pode ser classificado em função do tipo de escoamento: fluxo superficial e fluxo sub-superficial. Os leitos de fluxo sub-superficial podem ainda ser classificados de acordo com a orientação do escoamento em: fluxo horizontal e vertical (descendente e ascendente), ou ainda a combinação dos dois sistemas, os chamados sistemas híbridos (Vymazal, 2003).

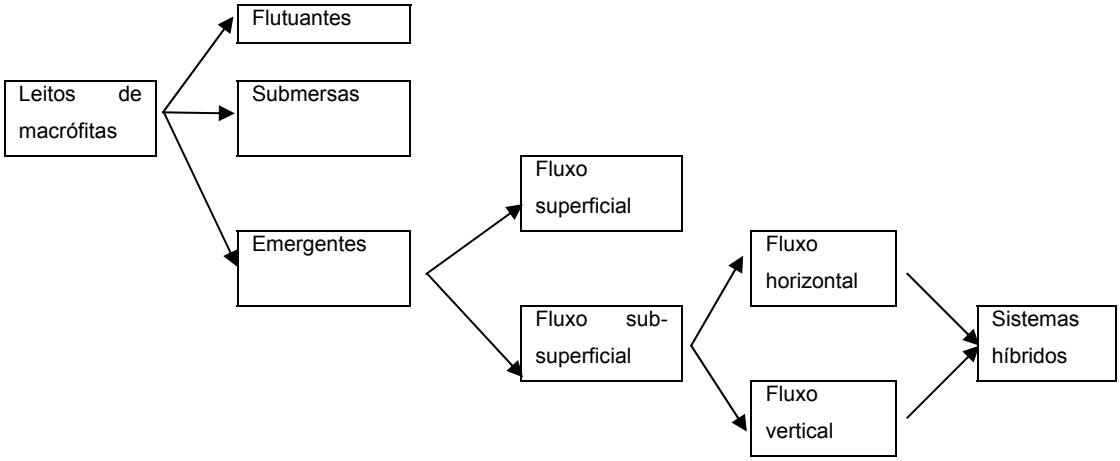

Figura 2.1 – Esquema dos tipos de leitos de macrófitas

2.3.1 – Sistema de macrófitas aquáticas flutuantes

Os sistemas de macrófitas aquáticas flutuantes utilizam plantas que são enraizadas ou plantas aquáticas livremente flutuantes. As macrófitas aquáticas flutuantes enraizadas são espécies como a *Nymphaea, a Nuphar, a Potamogeton* e a *Hydrocotyle*. As macrófitas aquáticas livremente flutuantes são espécies do género *Lemna, Spirodela*, e ainda os conhecidos jacintos-de-água (*Eichhornia crassipes*), alface da água (*Pistia stratiotes*) e os nenúfares (*Victoria regia*), sendo o leito das macrófitas constituído única e exclusivamente por água. Têm a vantagem das raízes se encontrarem totalmente em contacto com a água residual criando uma grande superfície de contacto entre as raízes e a água residual que proporciona um tratamento mais eficaz para os SST e poluentes orgânicos, absorvendo também grandes quantidades de azoto e fósforo. A Figura 2.2 mostra uma

representação esquemática de um leito de macrófitas aquáticas flutuantes. Estas espécies não alcançam um grande tamanho, sendo limitada a produção da sua biomassa, o que reduz o seu valor depurativo absoluto (Vymazal, 2003).

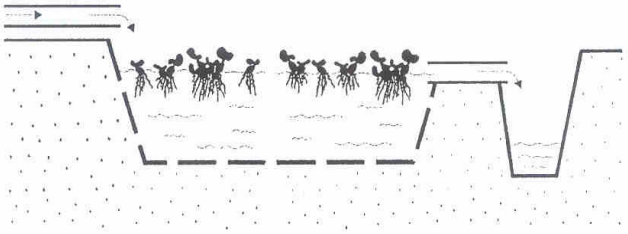

Figura 2. 2 – Sistema de macrófitas aquáticas flutuantes (Dias, 2000)

2.3.2 – Sistema de macrófitas submersas

Neste sistema as plantas têm os seus tecidos fotossintéticos totalmente imersos (Figura 2.3), favorecendo o tratamento das águas residuais, porque desta forma conseguem elevadas taxas de absorção das formas inorgânicas de carbono dissolvidas na água, principalmente de CO_2 e, elevada capacidade de libertação de O_2 fotossintético (Dias *et al*, 2000).

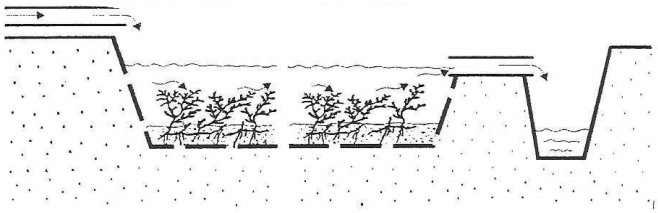

Figura 2.3 – Sistema de macrófitas aquáticas submersas (Dias, 2000)

A conjugação destes dois factores favorece o aumento dos valores de pH, bem como a criação de condições para a volatilização da amónia e da precipitação química do fósforo. Pelo facto da concentração de oxigénio ser elevada, ocorre com maior facilidade a mineralização da matéria orgânica presente na água. As espécies mais utilizadas neste tipo de sistema são a *Elodea nuttali, a Egeria densa, a Ceratophyllum demersum, a Hydrilla verticillata, a Cabomba caroliniana, a Miriophyllum hetrophylum e a Potamogeton ssp*. (Vymazal, 2003).

2.3.3 – Sistema de macrófitas aquáticas emergentes

O tratamento de águas residuais através de leitos de macrófitas aquáticas emergentes pode agrupar-se em dois grandes grupos de acordo com o tipo de escoamento:

1. Sistemas de fluxo superficial
2. Sistemas de fluxo sub-superficial, que podem ainda subdividir-se em:
    - Horizontal
    - Vertical

2.3.3.1 – Sistema de macrófitas aquáticas emergentes de fluxo superficial

Neste tipo de sistema a superfície livre do efluente permanece acima do nível do solo. A base do leito deverá ser bastante impermeável ou impermeabilizada e conter uma camada de solo arável, com uma espessura de 20 a 30 cm, para suporte das raízes das macrófitas, assemelhando-se ao que habitualmente se designa por lagoa. A densa vegetação emergente cobre uma significativa fracção da área superficial do leito, normalmente mais de 50% (Vymazal, 2003). Utilizam-se plantas enraizadas e bem adaptadas ao encharcamento, podendo ser vivazes em que as folhas secam no Inverno, rebentando novamente na primavera a partir dos rizomas. Como exemplo referem-se as *Phragmites* e os *Scirpus*. A eliminação dos contaminantes realiza-se através de reacções que têm lugar na água e quase nunca na zona inferior de contacto, uma vez que junto das raízes circula uma escassa quantidade de água residual, o que diminui o seu potencial de depuração. Os sistemas de fluxo superficial também podem ser concebidos com o objectivo de criar novos habitats para a fauna e flora, ou para melhorar as condições de humidade natural da região (EPA, 2000c). São pobres para a nitrificação, mas adequados para remover SST, CQO, CBO_5, bactérias e nitratos por desnitrificação biológica (Dias, 2000). Estes sistemas apresentam melhores taxas de remoção para o fósforo do que os sistemas de fluxo sub-superficial horizontal (Ansola *et al*, 2003). Na Figura 2.4 apresenta-se um esquema representativo do sistema de fluxo superficial.

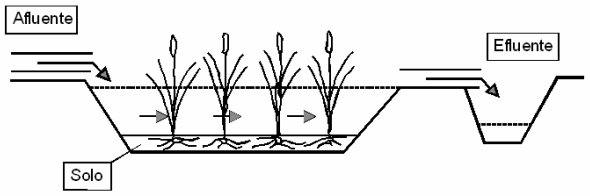

Figura 2.4 – Sistema de macrófitas aquáticas emergentes de fluxo superficial horizontal. (Vymazal, 2003)

2.3.3.2 – Sistema de macrófitas aquáticas emergentes de fluxo sub-superficial horizontal

Este tipo de sistemas é constituído por um leito artificial preenchido com solo natural ou artificial, com profundidade inferior a 1 metro, que suporta o crescimento de algumas espécies de plantas e por onde circulam as águas residuais que têm de atravessar uma extensão de solo (o leito) para atingir a saída e serem posteriormente descarregadas preferencialmente em linhas de água, como se pode ver na Figura 2.5.

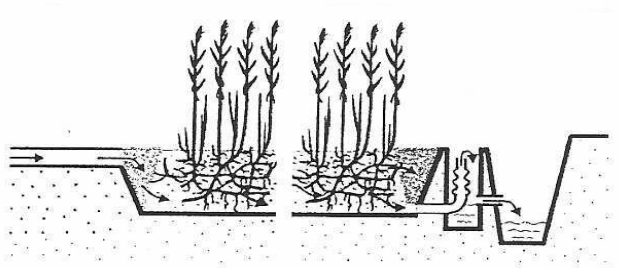

Figura 2.5 – Sistema de macrófitas aquáticas emergentes de fluxo sub-superficial horizontal. (Dias, 2000)

Na Europa predomina este tipo de sistemas visto que proporcionam um tratamento mais intensivo por unidade de área, comparativamente com os sistemas de fluxo superficial, bem como devido à sua eficiência. São também mais utilizados por apresentarem menos inconvenientes, nomeadamente o aparecimento de mosquitos ou odores (Saraiva, 2001). As espécies mais comuns são as *Phragmites e* as *Typhas*, por serem mais vulgares, desenvolvendo-se com relativa facilidade e contribuindo para a obtenção de bons resultados na depuração das águas residuais.

Este tipo de sistema é também designado na bibliografia como zonas húmidas artificiais ou construídas, fito-ETAR's, constructed wetlands, reed beds, filtro plantado com macrófitas, leitos de plantas ou ainda **leitos de macrófitas**, designação que vai passar a ser utilizada e que vai constituir o objecto de estudo deste trabalho.

2.3.3.3 – Sistema de macrófitas aquáticas emergentes de fluxo sub-superficial vertical

Este tipo de sistemas pode ter o fluxo descendente ou ascendente. No primeiro caso (Figura 2.6) o leito é constituído por uma base de gravilha e cobertura de areia. O funcionamento baseia-se essencialmente na rega intermitente do leito com água residual, que gradualmente vai percolando através das camadas superiores até à base sendo as macrófitas as responsáveis por manter a condutividade hidráulica. São mais eficientes que os de fluxo horizontal na nitrificação (Kadlec, 2003b).

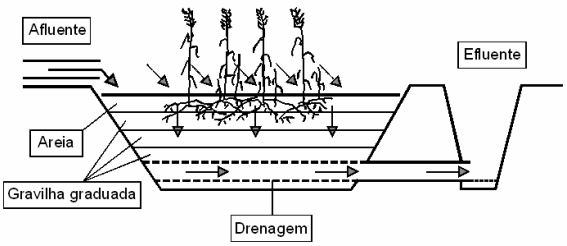

Figura 2.6 – Sistema de macrófitas aquáticas emergentes de fluxo sub-superficial vertical descendente (Vymazal, 2003)

Nos sistemas de fluxo ascendente (Figura 2.7) o leito é constituído da base para o topo por cascalho médio, gravilha e solo. Na parte inferior do leito estão distribuídos tubos que por meio de um sistema electromecânico injectam a água residual nesse mesmo leito. O escoamento ocorre por contra-percolação e por capilaridade (Dias *et al*, 2000).

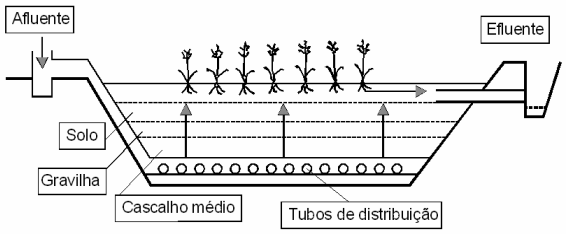

Figura 2.7 – Sistema de macrófitas aquáticas emergentes de fluxo sub-superficial vertical ascendente (Vymazal, 2003)

Existem ainda sistemas híbridos, ou mistos, que consistem na combinação dos vários tipos referidos, com o intuito de se conseguir uma melhor eficiência de tratamento, especialmente para a remoção de azoto. No entanto, estes sistemas são frequentemente compostos por fluxo horizontal e fluxo vertical, que em termos de tratamento secundário são bastante eficientes na remoção de CBO_5, SST e azoto (Vymazal, 2003 e Rousseau *et al*, 2004).

2.4 – Funcionamento dos leitos de macrófitas

O princípio básico do tratamento das águas residuais através de leitos de macrófitas, consiste em encaminhar as águas residuais decantadas para um leito, poroso e húmido com plantas hidrófitas (macrófitas), Figura 2.8. Os leitos de macrófitas não são mais do que leitos de oxidação, aos quais se incorporam plantas capazes de desenvolverem abundantes rizomas, que desta forma auxiliam o processo de oxidação da matéria orgânica presente nas águas residuais (Rodrigues, 2004). Este tipo de sistemas deve ser utilizado após um tratamento primário, para evitar problemas de colmatação e deficiente funcionamento dos leitos. São considerados sistemas "verdes", e desenvolvem-se segundo directrizes preferenciais, nomeadamente, o recurso à capacidade bioxigenadora e depuradora das plantas aquáticas e à reconstituição e optimização de zonas húmidas. São sistemas biológicos de tratamento de efluentes em que as plantas servem de suporte a microorganismos que os degradam. Este tratamento centra-se, entre outros aspectos, na remoção da matéria orgânica, de nutrientes como o azoto e o fósforo, e na redução de diversos microorganismos patogénicos (Relvão, 1999).

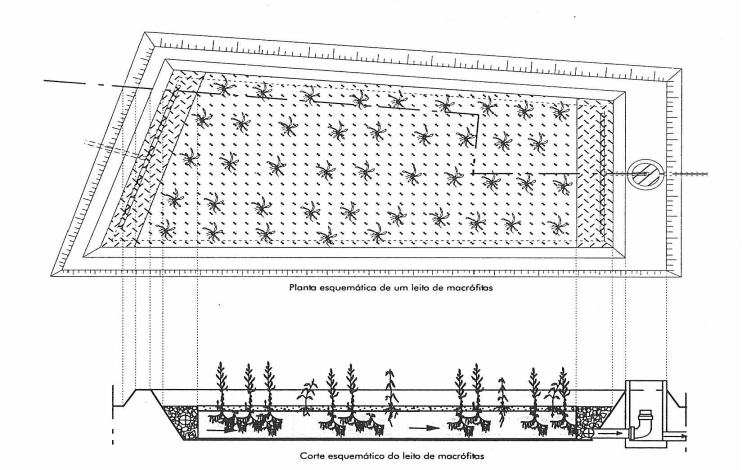

Figura 2.8 – Esquema de um leito de macrófitas de fluxo sub-superficial - planta e corte (Relvão, 1999)

Os leitos de macrófitas, podem ser aplicados não só no tratamento de águas residuais domésticas, mas também em efluentes industriais, podendo ser dado como exemplo de aplicação industrial a sua utilização na Quimigal, em Estarreja, em que são removidos compostos aromáticos (vestígios de anilina, nitrobenzeno e nitrofenoís, entre outros) (Dias, 1998).

A capacidade de tratamento das macrófitas aquáticas exerce-se, essencialmente, através de três mecanismos: assimilação directa dos contaminantes e subsequente acumulação de metabolitos não fitotóxicos dentro dos seus tecidos, libertação de exsudados que estimulam a actividade microbiana; transformações bioquímicas e aumento da degradação aeróbia na rizosfera devido ao transporte de oxigénio através do sistema vascular das plantas para junto da zona radicular (Dias, 2000).

A presença das macrófitas, é ainda importante sob o ponto de vista físico, pois a sua presença permite a estabilização da superfície dos leitos, impedindo, através do seu denso sistema de raízes a formação de canais de erosão, aumentando a condutividade hidráulica e efectuando a decomposição da matéria orgânica através da sua assimilação como fonte de nutrientes (Brix, 2003).

3 – SISTEMA DE MACRÓFITAS DE FLUXO SUB-SUPERFICIAL HORIZONTAL

3.1 – Descrição do sistema

O sistema de macrófitas aquáticas emergentes de fluxo sub-superficial, designado por muitos autores como SSF (subsurface flow), pode também ser apelidado de método rizosférico. Consiste em escavar um tanque no solo que será impermeabilizado e enchido com material petreo, de granulometrias diferentes, com uma camada de solo arável à superfície, onde são plantadas macrófitas e que se designa por leito. Estas plantas estão adaptadas a viver em águas com elevada carga orgânica e, através da fotossíntese, enviam oxigénio às raízes favorecendo a degradação da matéria orgânica, por intermédio dos microorganismos que vivem associados ao seu sistema radicular. A água residual distribui-se à entrada do leito proveniente de órgãos de pré-tratamento (fossa séptica ou tanque Imhoff) sujeitando-a ao seu atravessamento (translação) mais ou menos prolongado ao longo da zona das raízes e rizomas, como se exemplifica na Figura 3.1 (Reed *et al*, 1995).

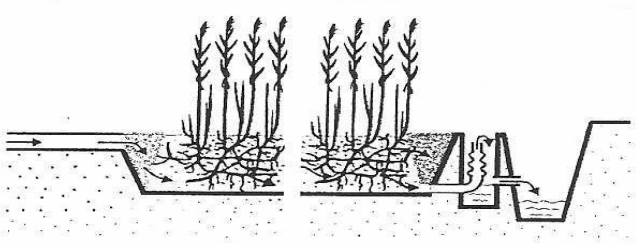

Figura 3.1 – Sistema de macrófitas aquáticas emergentes de fluxo sub-superficial horizontal (Dias, 2000)

Durante este percurso ocorrem diversos processos de natureza física, química e biológica, que contribuem para um bom rendimento depurativo do afluente (Dias, 2000). Dado que as reacções biológicas se devem ao crescimento de organismos, o leito composto por solo e gravilha tem maiores taxas de remoção em relação ao sistema de fluxo superficial (onde só existe água), o que permite uma menor área para o leito. Também o facto do nível da água estar abaixo da superfície do solo, para além de ser uma vantagem estética do sistema, faz com que se evitem problemas relacionados com os climas frios, já que esta capa de solo exerce uma maior protecção térmica do sistema de tratamento, podendo nas camadas inferiores continuar a decorrer com normalidade as reacções previstas (Etarplan, 2003).

A saída da água residual tratada efectua-se através de um dreno enterrado na extremidade oposta do leito. Este dreno está ligado a um sifão que permite regular a altura de descarga e, portanto a altura de água no leito. O nível de água deve ser mantido 5 cm abaixo da superfície do material filtrante, para evitar que a água circule à superfície do filtro, provocando um corte na cadeia de tratamento. Desta forma não existirá água livre à superfície, diminuindo o risco de proliferação de insectos e

aparecimento de odores (Guia da Comissão Europeia, 2001). Depois do sifão, o efluente é descarregado numa linha de água das proximidades.

Normalmente o leito deve ser impermeabilizado, no fundo e nos taludes, com uma tela de polietileno (PEAD) de 1,5 a 2 mm de espessura, como se exemplifica na Figura 3.2, para assegurar a sua estanquicidade, impedindo assim a contaminação das águas subterrâneas próximas e permitindo que as macrófitas tenham sempre substâncias alimentares (contaminantes) para se poderem desenvolver (Relvão, 1999). Os contaminantes são fornecidos pelo efluente carregado de matéria orgânica e outros poluentes, através dos quais as plantas garantem a sua subsistência e vão melhorando a qualidade da água (Serra, 1998). Poder-se-á dispensar a impermeabilização com tela, nos locais em que o solo onde se pretende implantar os leitos de macrófitas seja de origem argilosa (Relvão, 1999).

Figura 3.2 – Base e taludes do leito de macrófitas impermeabilizado com tela de polietileno (Sistema da Covilhã, 2000)

A importância da constituição do leito, frequentemente designado de meio, como auxiliar do tratamento do efluente, está relacionada com a necessidade de ter, criar e transportar diversos organismos, como por exemplo os protozoários, as algas do solo e os fungos, com vista a remover detritos orgânicos. Deste modo, o meio é um dos componentes essenciais para um tratamento eficiente, não devendo ser de granulometria muito fina (<0,2 mm) nem muito grossa (>4,0 mm), pois no primeiro caso (areia fina), dá-se uma maior eliminação de microorganismos, melhor absorção dos nutrientes e maior clarificação, mas em contrapartida é aumentada a área dos leitos, uma vez que a porosidade diminui. No segundo caso (cascalho grosso), é facilitada a condução hidráulica, evitando-se a colmatação, que ocorre principalmente nos dois primeiros anos de funcionamento, enquanto as plantas não estão completamente desenvolvidas. Contudo, estes solos não facilitam o crescimento das macrófitas e não têm um desempenho muito eficiente na clarificação dos efluentes e na remoção dos metais pesados, nutrientes e microorganismos. É habitualmente usado um misto de gravilha e areão uniforme, como garantia de uma boa permeabilidade, aconselhando-se a colocação de gravilha junto ao fundo do leito (Figura 3.3) (Wissing, 2003).

Figura 3.3 – Camadas constituintes do leito (Sistema da Covilhã, 2000)

O leito deve ser constituído por várias camadas de granulometrias diferentes, crescentes de cima para baixo, com alturas úteis também diferentes (Figura 3.4), evitando assim o risco de colmatação (Relvão, 1999).

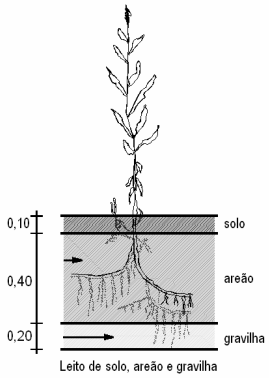

Figura 3.4 – Altura útil do leito de macrófitas (Relvão, 1999)

Em alternativa à gravilha pode utilizar-se poliestireno expandido reciclado, sendo a sua eficiência semelhante, principalmente na remoção de CBO, CQO, NH_3 e PO_4, podendo deste modo reduzir custos (Oliveira *et al*, 2006).

A característica principal das zonas húmidas é a saturação hídrica do solo, que origina uma redução do oxigénio disponível, ao ser consumido pela respiração microbiana e pela oxidação química. As raízes e rizomas das macrófitas são os principais intervenientes na condução hidráulica das águas residuais ao longo do leito, devido ao seu crescimento e desenvolvimento com várias orientações, efectuando o transporte do oxigénio que as plantas produzem através da fotossíntese, criando-se canais e passagens no substrato que impedem a colmatação do leito, como se pode ver na Figura 3.5. Enquanto a parte subterrânea das plantas não estiver muito desenvolvida, é natural que a circulação hidráulica não seja tão eficiente, até porque também se vão acumulando partículas no leito, contidas no efluente e a consequente formação de precipitados (Saraiva, 2001).

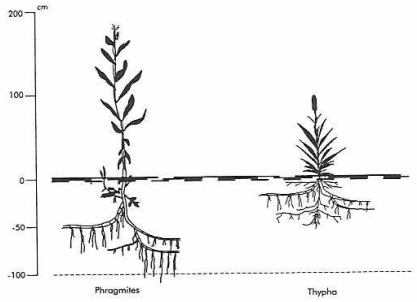

Figura 3.5 – Distribuição vertical das raízes e rizomas (Relvão, 1999)

O leito de macrófitas pode ter várias formas ou configurações, consoante a necessidade de adaptação ao terreno disponível, embora normalmente tenham formas rectangulares, de comprimento superior à largura. Contudo exige-se que o fundo do leito tenha uma inclinação descendente da entrada para a saída, na ordem dos 0,5% a 1,5%, para assegurar uma distribuição homogénea das águas residuais em todo o leito (Relvão, 1999). Esta inclinação não deve ser utilizada com o intuito de forçar a condução da água, porque o dimensionamento baseado na inclinação do leito é bastante sensível às variações do caudal e da condutividade hidráulica (Kadlec, 2003).

Para dimensões superiores a 500 m^2, o fraccionamento em várias unidades, de tamanho mais reduzido favorecerá a manutenção da instalação e melhorará a repartição hidráulica. A profundidade do leito deve ser igual à profundidade máxima de penetração de raízes (Guia da Comissão Europeia, 2001). Na prática, mesmo para dimensões inferiores a 500 m^2, é aconselhável ter pelo menos 2 leitos, para que desta forma, aquando das operações de manutenção, se evite que o funcionamento do sistema seja interrompido, podendo sempre manter-se um dos leitos activos (Dias, 2000).

3.2 – Tratamento físico-químico e biológico

O objectivo principal de um tratamento biológico é a remoção da matéria orgânica quimicamente oxidável, quantificável pela Carência Química de Oxigénio (CQO) e da matéria orgânica biodegradável, quantificável pela Carência Bioquímica de Oxigénio (CBO), do fósforo (P) e do azoto (N), estes últimos grandes responsáveis pela eutrofização de rios e albufeiras (Afonso, 1999). O processo assenta essencialmente na digestão microbiana, aeróbia e/ou anaeróbia, de substâncias em interacção com processos abióticos do solo (Serra, 1998), através de uma interacção plantas-solo-efluente, onde ocorrem diversos mecanismos e processos de natureza físico-química e biológica (Dias *et al*, 2000), que incluem a sedimentação, filtração, adsorção, volatilização, precipitação, decomposição, metabolismo bacteriano, metabolismo vegetal, absorção radicular e mortalidade natural (Saraiva, 2001).

O tratamento biológico consiste na transformação dos compostos complexos (compostos orgânicos) em compostos mais simples, como sais minerais, dióxido de carbono e outros. Na actividade

desenvolvida pelas bactérias é consumido o oxigénio livre existente no meio aquático (respiração aeróbia), que pode ser um factor limitativo para o crescimento bacteriano indispensável à depuração da água residual, se não houver uma forma de repor o oxigénio gasto. Pode levar inclusivamente ao crescimento de bactérias anaeróbias com a consequente diminuição de rendimento do processo e o desenvolvimento de cheiros bastante desagradáveis. Nos leitos de macrófitas não é necessário recorrer a processos electromecânicos para fornecer oxigénio ao leito, porque são as plantas que se encarregam de o produzir, revelando-se assim a sua importância no leito. Através da fotossíntese as plantas são capazes de produzir o oxigénio necessário ao desenvolvimento das bactérias (EPA, 1993). Por outro lado, as plantas necessitam para o seu crescimento de sais minerais, fósforo e azoto que se encontram em grande quantidade nas águas residuais domésticas, contribuindo desta forma para que a eliminação de fósforo e azoto também se faça de forma mais eficaz. O crescimento bacteriano tem outra função importante para a depuração das águas residuais que é a eliminação de partículas em suspensão (Dias, 2000).

A existência de micro-áreas aeróbias e anaeróbias, vai facilitar a ocorrência de fenómenos de nitrificação e desnitrificação, em simultâneo. Nas zonas anóxicas (sem oxigénio) que aparecem em espaços entre as raízes, ocorre a desnitrificação, que reduz os nitratos, azoto livre, através do desenvolvimento de bactérias desnitrificantes, sendo muito importante a escolha do tipo de escoamento a utilizar. São mais adequados para este fim os leitos de macrófitas emergentes de fluxo sub-superficial horizontal. A desnitrificação é um processo que pode ocorrer numa gama alargada de temperaturas, realizando-se durante todo o ano, mesmo em climas mais frios (Vymazal, 2002), mas é mais eficiente para valores de pH próximos da neutralidade, como a maioria dos processos microbianos. O condicionamento do tempo de retenção hidráulico no sistema torna-se um factor essencial na obtenção do grau de desnitrificação pretendido, isto é, a desnitrificação aumenta proporcionalmente com o tempo de retenção hidráulica (Dias, 1998). A capacidade de transporte do oxigénio difere de espécie para espécie, com consequentes diferenças de impacte na mobilização e solubilização de compostos, como o ferro, o manganês e o fósforo (Rodrigues, 2004).

A Figura 3.6 representa um esquema simplificado das condições de oxidação-redução em torno das raízes das macrófitas.

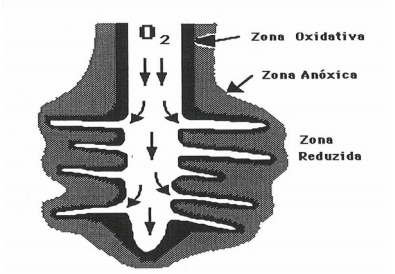

Figura 3.6 – Esquema simplificado das condições de oxidação-redução, junto às raízes de macrófitas (Relvão 1999)

O controlo do nível da água no leito é importante, na medida em que condiciona as reacções de oxidação-redução e a remoção dos microorganismos patogénicos, que é mais eficaz em meios não

totalmente encharcados (Relvão, 1999), podendo também o aumento excessivo do caudal afluente ao leito provocar alterações na remoção do CQO (Valentim *et al*, 2002).

A remoção do fósforo é resultado da adsorção, da complexação e da precipitação (Reed *et al*, 1995) e pode ser limitada a longo prazo, embora a melhor remoção se verifique durante os primeiros anos, através da sua fixação nas plantas e no solo (Sousa *et al*, 2002). O número de bactérias patogénicas e vírus vai diminuindo significativamente durante a passagem do efluente através do leito de macrófitas (Baptista, 2003).

A remoção dos poluentes depende das concentrações do efluente, da constituição do leito e também em grande parte do tipo de plantas utilizadas, pois são elas que transportam o oxigénio até às raízes e rizomas, local onde ocorrem processos importantes e essenciais para um tratamento eficaz (Relvão, 1999).

A depuração biológica das águas residuais requer sempre algum tempo de adaptação aos teores e à toxicidade dos seus componentes de modo a optimizar a eficiência do processo em curso, mas a variedade e qualidade da população microbiana do solo também é muito importante para o sucesso do processo (Dias, 1998). A metabolização dos compostos orgânicos ocorre através de algumas estirpes de microorganismos, originalmente presentes no solo, capazes de resistir e desenvolver a aclimatação aos componentes tóxicos das águas residuais a tratar.

A Figura 3.7. exemplifica um esquema sintetizado onde podem ser relacionados os processos e as reacções que ocorrem num leito de macrófitas.

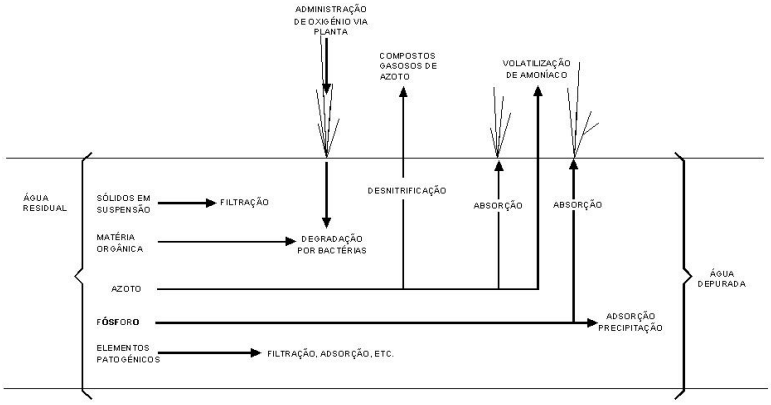

Figura 3.7 – Processos de depuração dos leitos de macrófitas

A eficiência do processo de oxidação da matéria orgânica depende de vários factores, tais como: composição do efluente a tratar; pH; potencial redox; presença de contaminantes e existência em solução de uma fonte de carbono facilmente biodegradável e de micronutrientes. Deve ter-se em atenção todos estes factores, para que se possa ajustar a alimentação dos leitos, de acordo com os critérios previamente estabelecidos (Dias, 1998).

Por estudos já efectuados nos leitos piloto do Instituto Superior Técnico (IST) e nos leitos existentes na Anilina de Portugal S.A., verifica-se que a diminuição da temperatura e a oscilação do pH, influenciam a actividade microbiana do solo e a actividade vegetativa das plantas, resultando numa diminuição até 20% durante as estações frias. Em zonas de alcalinidade elevada a redução da actividade é também muito acentuada (Dias, 1998).

No entanto, mesmo nos países de climas frios, as temperaturas baixas têm um reduzido efeito na remoção de CQO, não influenciando a remoção de fósforo. Abaixo dos 5ºC, a nitrificação e a desnitrificação podem ser parcialmente reduzidas, mas não há uma paragem completa do processo (Cui, 2006) atingindo valores óptimos para temperaturas entre os 25 e 35ºC. Nas diferentes estações do ano verificam-se alterações nas taxas de remoção dos nutrientes e poluentes orgânicos, diminuindo nas estações mais frias (Anzola *et al,* 2003). No entanto, no leito das macrófitas, local onde se dão as reacções, a temperatura é superior à do ambiente envolvente, devido ao efeito isolante da cobertura vegetal, ao calor libertado pela actividade microbiana, e também à própria temperatura da água residual, que geralmente é superior. Deste modo diminui-se o impacto das baixas temperaturas do Inverno, protegendo as zonas de infiltração e a rizosfera (Oliveira, 1995).

3.3 – Eficiência do tratamento

O rendimento de uma ETAR de plantas traduz-se na despoluição das águas residuais, cultivando-se em solos contaminados, plantas de crescimento rápido cujas raízes podem penetrar em toda a altura desse mesmo solo. No entanto o grau de despoluição está dependente de factores como o tipo de afluente, as plantas utilizadas, a espessura e a porosidade do leito de macrófitas.

O tratamento do efluente ao nível da depuração é efectuado no solo (depuração rizosférica) através de diversos processos físicos, químicos e biológicos, sendo a remoção da CBO_5 e dos SST bastante boa, conseguindo-se mesmo a eliminação do fósforo por fenómenos de adsorsão e precipitação, de acordo com estudos efectuados em sistemas idênticos em diversos países com climas diferentes (Sezerino, 2005b). Os resultados esperados são segundo Relvão (Relvão, 1999), 50 a 95% e segundo Puigagut (Puigagut, 2006) 80 a 95% para a remoção da CBO_5 e de 60 a 98% (Relvão, 1999) e 70 a 95% (Puigagut, 2006) para os SST (Relvão, 1999), 82 a 88% para CQO (Oliveira, 1995), 24 a 70% para compostos azotados e 15 a 68% para remoção do fósforo (Relvão, 1999). Estas percentagens de remoção para águas residuais domésticas conduzem, na generalidade das situações, ao cumprimento da legislação em vigor no que respeita aos limites de descargas de águas residuais (D.L. 236/98).

No Quadro 3.1. são apresentados os valores limite de emissão de alguns parâmetros analisados na descarga das águas residuais domésticas.

Quadro 3.1 – Valores limite de emissão (VLE) na descarga de águas residuais domésticas (D.L. 236/98)

Parâmetros	Expressão dos resultados	Valor Limite de Emissão
pH	Escala de Sorensen	6,0 a 9,0
CBO_5	mg/l O_2	40
CQO	mg/l O_2	150
SST	mg/l	60
Fósforo	mg/l	10
Azoto	mg/l	15

Os leitos de macrófitas com funcionamento inferior a três anos apresentam menor rendimento, porque o sistema ainda não se considera a funcionar em pleno, uma vez que as plantas e as raízes ainda estão em crescimento. Por outro lado, com o decorrer do tempo pode também diminuir a capacidade original de filtração do leito (Valentim e Roston, 2002).

Para um alto tempo de retenção (6 a 8 dias) e baixas velocidades de escoamento, maiores serão as remoções. De uma forma geral, pode afirmar-se que, em tratamento secundário, a nitrificação é limitada, mas a desnitrificação é muito boa. Os rendimentos relativamente à eliminação do fósforo dependem do tipo de solo utilizado, mas são relativamente fracos (Guia da Comissão Europeia, 2001).

É importante evitar a chegada ao sistema de águas de infiltração abundantes, devendo-se desviar as águas pluviais, porque a carga hidráulica poderia ser excessiva e a eficiência é afectada nestes casos. No entanto, quando entra no sistema um efluente clandestino, dificilmente tratado devido à sua toxicidade, podemos observar que numa ETAR convencional há uma quebra no seu funcionamento, porque nestes casos a população microbiana está completamente desprotegida e não consegue enfrentar o "ataque" destes componentes tóxicos. Nos leitos de macrófitas, pelo contrário, a população microbiana está protegida pelo solo e pelas plantas, que quando se sentem atacadas por elementos tóxicos segregam exsudados, tipo polissacaridos para se defenderem, protegendo a rizosfera e os microorganismos que lá estão. A população microbiana continua a actuar mas nunca chega a entrar em contacto com concentrações muito elevadas de poluente, porque conta com a barreira de protecção por parte das plantas (Davies *et al*, 2004 e Dias, 2000).

Num estudo efectuado sobre leitos de tratamento de águas residuais, verificou-se que sistemas plantados com macrófitas emergentes apresentam uma maior eficiência na remoção de CBO, azoto e fósforo, quando comparados com sistemas não plantados. Em relação à remoção de CBO, comparando as diferentes espécies de macrófitas, não há diferenças significativas (Tomoko, 2006).

3.4 – Tipos de plantas mais comuns

As plantas aquáticas emergentes são espécies vegetais anfíbias, que vivem em águas pouco profundas, enraizadas no solo e cujos caules e folhas emergem fora da água, podendo alcançar 2 a 3 metros de altura. Estas plantas, intermédias entre as aquáticas e as terrestres propriamente ditas, são muito vigorosas e produtivas em virtude de aproveitarem as vantagens dos dois meios, o terrestre e o aquático.

São as plantas que constituem os leitos de macrófitas que vão contribuir para a oxigenação de todo o meio, através do transporte descendente do oxigénio para o substrato, suportando a actividade metabólica dos organismos aeróbios na depuração e ajudam a manter uma boa condução hidráulica no leito, sendo o órgão principal deste tipo de sistemas. O aspecto dos leitos de macrófitas é sem dúvida dependente das plantas existentes, pelo que se tornam uma peça configuradora da ETAR e da sua fisionomia geral (Oliveira, 1995).

Uma grande variedade de plantas tem sido usada nos leitos de macrófitas para tratamento de águas residuais, mas as mais frequentes são as *Typhas, Phragmites, Juncus e Scirpus* (Reed *et al*, 1995). Para um bom desempenho das macrófitas, será melhor que as plantas a serem utilizadas existam já nas proximidades do local de implementação, para que a adaptação seja mais rápida e eficaz (Saraiva, 2001). Devem ser plantas de elevada evapo-transpiração, boa tolerância a águas de salinidade média e elevado teor em azoto, que são características dos efluentes das fossas sépticas. A evapotranspiração, além de ter um contributo significativo na redução do volume de água no leito, chegando a registar valores de redução superiores a 80%, entre a entrada e a saída desse mesmo leito (Ribeiro, 2007), tem um efeito benéfico nas taxas de remoção e no desempenho do sistema em geral (Chazarenc *et al*, 2003).

As plantas macrófitas fixam vários compostos químicos e propiciam o desenvolvimento de microorganismos, responsáveis pela degradação dos poluentes orgânicos e inorgânicos. Até mesmo as águas residuais carregadas de poluentes provenientes das máquinas de lavar, são tratadas pelas plantas que também se alimentam dos fosfatos contidos nestes efluentes. Se as macrófitas forem plantadas de raiz nua, o processo de tratamento torna-se mais demorado, porque tem de se esperar que elas enraízem para se dar início ao crescimento e ao seu eficiente desempenho (EPA, 2001).)

Na Figura 3.8 pode ver-se uma plantação de macrófitas, neste caso *Typhas*, possivelmente enraizadas, mas ainda sem desenvolvimento aéreo.

Figura 3.8 – Plantação de macrófitas (Sistema da Covilhã, 2000)

Nas plantas que fazem o tratamento, a parte aérea (folhas e caule) têm como função atenuar a luz, reduzindo o crescimento de fitoplânton e algas, influenciar o microclima e reduzir a velocidade do vento, reduzindo o risco de ressuspensão de sólidos depositados, melhorar o aspecto estético da zona envolvente, servir como armazém de nutrientes e funcionar como um filtro. As raízes (e rizomas), parte subterrânea, podem servir de suporte à fixação para microrganismos, fornecer oxigénio, promover a biodegradação, remover nutrientes, estabilizar a superfície de sedimentos, reduzir a erosão e prevenir a colmatação do leito (Brix, 2003). As plantas adultas estabelecem melhor contacto entre a rizosfera e o efluente (Chazarenc *et al*, 2003).

A diversidade de espécies num mesmo sistema, não tem sido bem sucedida, na maior parte dos casos, porque a concentração relativamente alta de certos poluentes das águas residuais, tende a favorecer o crescimento de umas espécies em detrimento de outras, através da competição que pode mesmo levar ao desaparecimento da espécie mais debilitada. A maioria dos leitos de macrófitas são constituídos por monoculturas, ou no máximo por 2 ou 3 espécies de plantas, que sobrevivem e mostram excelentes resultados no tratamento de águas residuais (Reed, 1995). É possível utilizar-se uma combinação de plantas no mesmo leito, desde que estejam separadas por espécie, uma no troço inicial, outra no final (Relvão, 1999). O uso de diferentes espécies, com floração em épocas distintas melhora o aspecto dos leitos de macrófitas, aumentando o interesse pela estética destes sistemas (Borinaud *et al*, 2006).

A variedade de plantas a utilizar nestes meios húmidos é variada, podendo salientar-se os seguintes tipos:

Espécies arbustivas: *Aucuba, Bambus sp, Calycantus floridus, Cornus alba, Cornus florida, Cornus stolonífera, Phragmites communis, Phragmites australis, Scirpus lacustris, Rhamus frangola, Juncus inflexus, Juncus effusus, Typha latifólia*, entre outras.

Espécies herbáceas: *Iris pseudacorus, Iris kaempferi, Lythum officinalis, Petasites officinalis, Auruncus silvester*, entre outras.

As plantas emergentes que frequentemente se encontram na maioria dos leitos de macrófitas para tratamento de águas residuais incluem *Typhas*, *Scirpus*, *Juncus*, *Phragmites* e *Íris* (Quadro 3.2),

sendo as *Phragmites* as mais utilizadas na Europa pelas suas características de bom desenvolvimento, crescimento e adaptação (Relvão, 1999).

Quadro 3.2 – Classificação de macrófitas (UTAD, 2007)

Família	Espécie	Sinonímias	Nome comum
Iridaceae	*Irís Pseudacorus*		Lírio-amarelo-dos-pântanos
Juncaceae	*Juncus effusus*	*Juncus communis*	Junco
Gramineae	*Phragmites australis*	*Phragmites communis*	Caniço
Cyperaceae	*Schoenoplectus lacustris*	*Scirpus lacustris*	Bunho
Typhaceae	*Typha latifolia*		Espadana

Para seleccionar as espécies que se irão empregar na depuração de águas residuais, é necessário ter em conta uma série de critérios:

- Que sejam de crescimento rápido, tendo em conta que durante a época invernal o seu crescimento diminui um pouco (EPA, 2001);
- Para leitos de alturas superiores a 60 cm deve optar-se pelas *Phragmites*, cujas raízes conseguem atingir profundidades da ordem dos 100 cm;
- Sempre que os efluentes possam apresentar altos teores de sódio, como é o caso das águas residuais em povoações do litoral onde podem ocorrer infiltrações de águas salobras, é recomendável a utilização de caniços do género "*Phragmites australis*" ou "*Phragmites vulgaris*";
- Que as raízes se desenvolvam e cresçam rapidamente, pois normalmente este crescimento está relacionado com a presença de nutrientes, crescendo em profundidade à medida que estes vão diminuindo;
- Que sejam resistentes à salinidade presente nas águas residuais, que varia ao longo do processo de tratamento devido às reacções que vão ocorrendo (Reed *et al*, 1995);
- Que tenham um elevado rendimento na clarificação das águas residuais e na eliminação de nutrientes;
- Que tenham uma utilidade posterior, como forragem de currais ou incorporação na compostagem de detritos vegetais (Oliveira, 1995);
- Que sejam de fácil controlo.

De seguida faz-se uma breve descrição das espécies de macrófitas mais utilizadas nos sistemas de tratamento de águas residuais domésticas em Portugal.

3.4.1 – *Iris* (lírio amarelo dos pântanos)

Planta herbácea, com rizomas ou bolbos subterrâneos, folhas estreitas e lineares, textura rija, de nervação paralela (Figura 3.9). Conhecida como "Lírio amarelo dos pântanos", é uma planta perene,

de rizoma robusto com 1 a 4 cm de diâmetro, raízes com 10 a 30 cm de comprimento, flores no topo de pedúnculos erectos, hermafroditas, cor amarela viva ou pálida (Franco *et al*, 1998).

Figura 3.9 – *Íris pseudacorus* (UTAD, 2007)

Sendo nativa da Europa, Norte de África e toda a região Mediterrânica, esta planta encontra-se actualmente espalhada por todos os continentes. O lírio-dos-pântanos está bem adaptado a climas temperados. Cresce em água com profundidade até 25 cm ou muito perto da água, predominantemente em zonas húmidas de água doce. Tolera solos ácidos (pH entre 3,6 e 7,7) e grandes períodos de anoxicidade. Esta espécie cresce a partir de sementes ou divisões vegetativas após a floração, que se dá entre Maio e Junho, podendo ser idealmente transplantada nesta altura (Tutin, 1980). Encontra-se em rios, pântanos arrozais, por todo o País, sendo menos utilizada que as *Phragmites* ou as *Typhas*, por exemplo, mas demonstrando remoções semelhantes ou superiores às *Phragmites* (Rodrigues *et al*, 2004).

3.4.2 – *Juncus* (junco)

Planta herbácea de terrenos pantanosos ou alagadiços, com folhas lineares, graminiformes, cilíndricas ou achatadas, frequentemente confundidas com elementos da família *Poaceae* e *Cyperaceae* (Figura 3.10) (Joly, 1993). Efectivamente, em termos morfológicos e para olhos pouco treinados, a semelhança é grande: todas elas apresentam aspecto graminiforme e flores drasticamente reduzidas. Contudo, as 3 folhas basais, as flores e o fruto distinguem-na morfologicamente. Apresenta raízes finas inseridas num caule subterrâneo (rizoma) vertical ou horizontal. Desenvolve-se bem em locais onde não haja muita geada ou sol muito forte. O seu tamanho depende das condições locais, podendo ficar entre os 30 cm e os 120 cm de altura. Prefere substrato rico em matéria orgânica, sempre húmido ou submerso. A sua propagação dá-se geralmente pela divisão do rizoma na Primavera, mas pode também ser por sementes (UC, 2007).

Figura 3.10 – *Juncus* (UC, 2007)

São plantas de crescimento lento, via rizomas e algumas destas espécies podem desenvolver-se em zonas permanentemente inundadas, com pH óptimo entre 5,0 e 7,5 (Reed *et al*, 1995). Os juncos são de extrema importância na ecologia dos rios em muitas regiões – e de diversas formas. No geral, contribuem para a consolidação das terras nas margens dos cursos de água e para a imobilização das areias soltas que são seguras pelos seus rizomas grandes e estolhos longos (Franco *et al*, 1998).

3.4.3 – *Phragmites* (caniço)

São plantas que se encontram nas zonas húmidas, margens dos cursos de água e valas, desde o Minho ao Alentejo, colmo erecto, atingindo 2 a 4 metros de altura, são anuais, com rizomas perenes, estendendo-se até à profundidade de 0,6 m, extensos e rastejantes, muitas vezes com rebentos. Multiplica-se vegetativamente com facilidade, por gomos adventícios, efectuando um recobrimento do solo num ano se forem plantadas com um espaçamento de 0,6 m. Apresenta folhas lanceoladas com 15 a 60 cm de comprimento e 1 a 6 cm de largura, sem pelos, verdes, panícula amarela acastanhada ou arroxeada com 15 a 40 cm de comprimento, densamente florida (Franco *et al*, 1998) (Figura 3.11).

Figura 3.11 – Leito constituído por *Phragmites* (Sistema de Salamonde, 2002)

Cresce melhor em solos argilosos firmes onde o nível da água flutua entre os 15 cm abaixo e os 15 cm acima da superfície do solo, sendo tolerante a salinidade moderada e a pH entre 2 e 8. Em caso de incêndio suporta o fogo se o nível da água estiver acima do solo, mas tal não é necessário para a sua manutenção. As temperaturas óptimas de sobrevivência situam-se entre os valores de 6,6 ºC e 26,6 ºC.

É a variedade mais utilizada na Europa, devido à sua velocidade de crescimento, ao seu desenvolvimento radicular à sua resistência às condições de saturação do solo e por serem bastante eficazes na transferência de oxigénio, uma vez que os seus rizomas penetram verticalmente, e mais profundamente que os das *Typhas*, mas menos que os *Juncus*. A plantação pode realizar-se a partir do transplante de plantas jovens, sementes, rebentos ou rizomas com uma densidade de 4 plantas por m^2 (Guia da Comissão Europeia 2001). Apresentam ainda, a vantagem de ter um baixo valor alimentício e consequentemente não são atacadas por animais, como acontece com outros tipos de plantas. A acção auto-depuradora destas plantas é reforçada pela acção de organismos heterotróficos, que se desenvolvem no nicho formado pelos caules e pelo raizame.

3.4.4 – *Scirpus*

São plantas herbáceas perenes e crescem em grupos, em diversos tipos de águas interiores, costeiras, pântanos e zonas húmidas, sendo as sementes e os rizomas fonte alimentar para diversos animais (Reed *et al*, 1995). (Figura 3.12). Possuem caules triangulares, 3 folhas basais, ausência de lígula e bainhas fechadas (Joly, 1993). O caule é produzido a partir de rizoma, pode crescer até 3 metros de altura; florescência de Março a Novembro, flores castanho-avermelhadas em forma de espiga, cada flor é séssil ou encontra-se ligada ao caule por um pedúnculo delgado. Crescem no topo do caule e são normalmente ultrapassadas por uma única bráctea que se assemelha à continuação do caule; as flores adquirem uma penugem quando se transformam em fruto (Tutin, 1980).

Figura 3.12 – Scirpus lacustris (UC, 2007)

As raízes destas plantas atingem a profundidade de 0,6 m e desenvolvem-se em meios com pH entre 4 e 9, podendo estar permanentemente inundados, mas também resistem bem às secas. Esta variedade de plantas é muito utilizada nos leitos de macrófitas dos EUA (Reed *et al*, 1995).

3.4.5 – *Typha* (espadana)

Planta rizomatosa, aquática ou palustre, com caules mais ou menos erectos com 1,5 a 3 metros altura, 0,9 a 2 cm de diâmetro no centro e 0,3 a 0,6 cm perto das flores, folhas basais rectas, dísticas e lineares, que podem atingir, nalguns casos, 15 mm de largura. De cada rebento saem 12 a 16 folhas de cor verde-acinzentada pálida, de estrutura comparável a uma fita, com secção esponjosa contendo canais de ar. Tipicamente as folhas não se prolongam para além da espiga; rizomas robustos, 0,6 a 3,2 cm de diâmetro e até 70 cm de comprimento, estendendo-se a uma profundidade de 7,5 a 10 cm abaixo do nível do solo. Possui flores estruturadas numa espiga densa e castanha escura no topo do caule (Joly, 1993).

Na Figura 3.13 pode ver-se na imagem da esquerda a planta ainda jovem e na imagem da direita um leito de *Typhas* já com algum desenvolvimento.

Figura 3.13 – *Typhas* (Sistema de Condeixa – 2003)

Encontram-se espalhadas por quase todo o mundo: América do Norte, América Central, Europa, Ásia, África, Austrália e Nova Zelândia. Os habitats mais comuns desta espécie incluem prados com solos húmidos, pântanos, pauis e margens de lagos, lagoas, estuários e linhas de água. Tolera inundações frequentes, mas geralmente restringe-se a áreas onde a profundidade da água não excede os 80 cm. Cresce sobretudo em águas doces, mas é também tolerante a águas salobras (Tutin, 1980).

As *Typhas* têm tendência a crescer em solos com grandes quantidades de matéria orgânica, podendo igualmente crescer em solos minerais de textura fina, ácidos ou calcários, que tenham matéria orgânica nas camadas superficiais, com pH compreendido entre 4 e 10. Têm os rizomas enterrados no solo e muitas vezes submersos, com 0,3 m de profundidade (Reed *et al*, 1995). São plantas que podem ser semeadas ou transplantadas na forma de rebentos, sendo a altura ideal para o fazer o Verão. Propagam-se com muita rapidez, podendo tornar-se invasoras se não forem controladas (Joly, 1993) Se houver necessidade de proceder ao corte destas plantas, é aconselhada a época do

Outono. É robusta, capaz de crescer em diversas condições do meio ambiente, propaga-se facilmente, produz uma grande biomassa anual, mas tem um pequeno potencial de redução azoto e fósforo se for podada e colhida (Reed *et al*, 1995).

3.5 – Aspectos construtivos

A construção dos leitos de macrófitas requer diversos cuidados pois condiciona o eficiente funcionamento dos sistemas. Este tipo de tratamento é aconselhado para águas residuais que tenham sofrido anteriormente um pré-tratamento adequado, tipo fossa séptica ou tanque Imhoff (primário ou secundário, consoante o tratamento pretendido), com intuito de evitar a colmatação do leito. A localização da fossa séptica deve ser feita em zonas de baixo nível freático, em que não seja prevista a inundação da mesma. Assim, não deve ser construída em terrenos pouco consistentes, do tipo pantanoso, correndo o risco de afundamento. Tem de ser um elemento estanque, sem perdas ou fugas das águas residuais, para que não haja infiltrações nos terrenos adjacentes. A fossa séptica ou do tanque Imhoff, devem ser cheios de água imediatamente após a construção, não devendo nunca mais ser esvaziados (Relvão 1999).

Deve considerar-se no dimensionamento dos leitos de macrófitas, o tempo de retenção hidráulica adequado, para que a água possa estar no leito o tempo necessário para se darem as transformações biológicas e químicas dos contaminantes, e para que a sedimentação venha a ocorrer (Alexandre, 2000). Sempre que possível deve dimensionar-se o leito de macrófitas depois de se conhecer o local onde o mesmo vai ser implantado porque, apesar de haver alguma versatilidade na configuração do leito, deve optar-se pela melhor adaptação ao terreno. No entanto devem ser mantidas as relações entre o comprimento e largura inicialmente previstas. Deve proceder-se à limpeza e desmatação do terreno, para que não haja pedras e plantas infestantes a interferir no sistema de tratamento. O produto resultante da escavação, para instalação do leito, pode ser reaproveitado na construção do mesmo se tiver características adequadas. É também necessária a escavação de valas para instalação de colectores, a compactação e regularização do fundo e taludes do leito, que deverá ficar limpo de pedras e paus, que possam vir a prejudicar a colocação da tela impermeabilizante, em polietileno (PEAD) com 1,5 a 2 mm de espessura (Relvão, 1999). Aconselha-se a execução de câmaras de visita estanques, na entrada e saída do leito, para se poder fazer a monitorização do efluente. Posteriormente deve ser colocada a brita com dimensões de 15x30 mm, nas obras de entrada e saída do leito.

No interior do leito serão colocadas de acordo com o projecto, gravilha, areão, e solo especial (mistura do solo retirado da escavação e solo optimizado, rico em alimento para as plantas). A plantação das macrófitas deverá ser feita, aproximadamente, de 30 em 30 cm, tendo que ser regada de imediato, e caso ainda não haja efluentes, deverá efectuar-se a rega frequentemente. Preferencialmente, estas plantas devem já estar “stressadas”, isto é, devem vir de um ambiente idêntico ao que se quer proporcionar neste leito, para que o processo de tratamento se desenvolva

com uma maior rapidez e eficiência. Uma outra hipótese a considerar é a plantação de rizomas ou caules, sendo também necessário efectuar a rega, caso os efluentes não se encontrem ligados. Salvaguardando a situação de rega, é aconselhável que o leito seja inundado até cerca de metade da sua altura com água, no início do funcionamento, para que as plantas não estranhem o meio para o qual foram transplantadas, aumentando as suas probabilidades de sobrevivência e desenvolvimento. Esta semi-inundação é conseguida através do dispositivo colocado na câmara de visita de saída, que ao ser accionado impede a saída do efluente. É importante que este dispositivo esteja colocado em local de fácil acesso, para que se possa fazer a regulação do efluente, evitando a inundação completa do leito, que poderia provocar o aparecimento de maus cheiros e de mosquitos (Relvão, 1999) (Figura 3.14).

Figura 3.14 – Inundação do leito de macrófitas (Sistema de Condeixa – 2005)

A câmara de visita à entrada do leito, deverá ser ventilada, caso o órgão de tratamento primário seja uma fossa séptica, para que se possam libertar gases concentrados. O leito deve ter uma inclinação na ordem dos 0,5 a 1,5% (Relvão, 1999) no máximo até 2%, sendo normalmente utilizado em Portugal 1% (Dias e Martins-Dias, 2003), mas somente no fundo e não na parte superficial, pois nesse caso, os riscos de erosão superficial seriam maiores.

3.6 – Manutenção e operação

Os leitos de macrófitas, apesar de serem um sistema de baixa tecnologia, necessitam de alguma conservação e assistência para se obter bons resultados, respeitando procedimentos de manutenção e operação, quer nas fossas sépticas, nos tanques Imhoff e nos próprios leitos, de acordo com as seguintes indicações (Morais *et al*, 2006)):

3.6.1 – Órgãos de pré-tratamento

A manutenção que terá de ser efectuada na fossa séptica durante o seu período de funcionamento, consiste em retirar as lamas e as escumas superficiais em intervalo de tempo variável mas, mais frequentemente de dois em dois anos, podendo incorporá-las no solo onde crescem as macrófitas, enviando-as para um aterro sanitário, ou ainda utilizando-as como fertilizante em solos bem desenvolvidos e profundos, como refere o Decreto-Lei nº 446/91 de 22 de Novembro (CCRC, 1989).

Deve também limpar-se a grelha que fica imediatamente antes da entrada da fossa séptica, para evitar que detritos entrem no sistema e ponham em causa o seu normal funcionamento.

Na superfície do tanque Imhoff vão-se acumulando escumas, provenientes da digestão das lamas, que devem ser quebradas sempre que seja necessário, para que possa ocorrer a libertação de gases provenientes da digestão da matéria orgânica. Devem retirar-se as lamas digeridas para leitos de secagem, quando apresentarem cor negra e sem cheiro desagradável. De preferência não devem utilizar-se sistemas de bombagem na elevação das águas residuais para o tanque Imhoff, para evitar possíveis problemas de avarias (Relvão, 1999).

3.6.2 – Leitos das macrófitas

A operação e manutenção dos leitos de macrófitas deve centrar-se essencialmente em assegurar que o caudal alcance todas as partes do leito, para manter um ambiente saudável para os microorganismos, mantendo um crescimento vigoroso da vegetação (Relvão, 1999):

A percolação ou condução hidráulica que ocorre no leito de macrófitas é uma das fontes de alimentação das plantas, sendo necessário verificá-la semanalmente através das caixas de visita que se encontram nos topos dos leitos (Santiago, 1999). No caso de haver indícios de colmatação, que se verifica através da inundação do leito, deve proceder-se à regulação e limpeza dos dispositivos de saída da caixa (Figura 3.15), controlando o nível hidráulico que percorre todo o leito (Kadlec, 2003 e EPA, 2001), ou ainda proceder à desobstrução do tubo que alimenta o leito, através de jactos de água (Santiago, 1999).

Figura 3.15 – Caixa de visita à saída dos leitos de macrófitas e tubo de regulação (Sistema de Salamonde – 2002)

Se se tratar de um leito antigo, com muito tempo de funcionamento, e se forem verificados indícios de colmatação, deve inspeccionar-se toda a ETAR, porque um dos problemas pode estar nas lamas da fossa séptica ou tanque Imhoff, que terão de ser retiradas caso estejam em excesso. Para que o leito esteja a funcionar em boas condições é necessário que o nível da água seja mantido entre os 5 e os 10 centímetros abaixo da superfície do solo, em toda a sua área.

Os dispositivos de entrada e saída do efluente devem ser inspeccionados e limpos de 6 em 6 meses, por forma a garantir um controle correcto do nível de saída do efluente, que impeça a inundação superficial e limite a ocorrência de problemas associados à presença de cheiros ou à proliferação de insectos (Mano *et al*, 2003).

As plantas velhas e as que estiverem em excesso, podem ou não, ser retiradas anualmente, na época do Outono. No caso de serem removidas podem ter várias utilizações: na agricultura como fertilizante, na alimentação de animais ou incorporá-las na compostagem (Oliveira 1995). Quando não se procede à remoção das plantas, depois de secas acabam por cair sobre o leito e durante alguns Invernos aumentam o substrato, que ajuda a criar uma camada protectora da superfície do leito, evitando as baixas temperaturas no Inverno e a evapotranspiração nos meses mais quentes. Deste modo, convém deixar uma margem livre de 30 cm, aproximadamente, entre o leito e o passeio, para que as plantas não se acumulem em locais de passagem (Etarplan, 2003).

A manutenção do leito deve incluir também a limpeza manual de infestantes, que surgem imediatamente a seguir à preparação do solo e nos primeiros meses de funcionamento. Quando as plantas estiverem bem desenvolvidas, a remoção das infestantes pode ser efectuada inundando todo o leito, durante um dia. Não devem ser usados herbicidas, a não ser em casos extremos, e com as devidas precauções, dado que pode danificar-se severamente a vegetação existente.

Na Figura 3.16, pode ver-se um leito de macrófitas, plantado com *Typhas*, e algumas espécies de infestantes, principalmente em zonas onde as *Typhas* são mais escassas.

Figura 3.16 – Leito de macrófitas com algumas infestantes (Sistema da Covilhã, 2000)

Se forem detectados sinais de toxicidade nas plantas, pode ser indício de efluentes tóxicos, que provoquem um excesso de nutrientes ou excesso de poluição química de baixa biodegrabilidade. Estes casos podem ser devidos a descargas de suiniculturas, adegas ou até mesmo destilarias, devendo fazer-se uma inspecção à rede de recolha das águas residuais, para detectar onde ocorre essa descarga e evitar que o sistema continue a receber este tipo de efluente, caso este leito de macrófitas não tenha sido concebido para este tipo de águas residuais.

No Quadro 3.3 apresenta-se um resumo das tarefas que devem ser efectuadas nos leitos de macrófitas, a frequência e os objectivos a atingir.

Quadro 3.3 – Tarefas a efectuar num leito de macrófitas (Guia da Comissão Europeia, 2001)

Tarefa	Frequência	Observações
Manutenção das instalações de pré-tratamento	1 vez por semana	O objectivo é assegurar o seu bom funcionamento e que não se verifiquem descargas demasiado elevadas de SST que possam provocar colmatação do leito.
Regulação do nível de saída	1 vez por semana	O ajuste regular do nível de saída de água permite evitar os escoamentos de superfície. Convém verificar a boa distribuição do afluente no leito. A limpeza do dispositivo de alimentação deve ser prevista aquando da concepção.
Remoção de ervas	Quando necessário durante o 1º ano	Durante o 1º ano , convém remover as ervas daninhas manualmente, a fim de não prejudicar o desenvolvimento das macrófitas.
Corte das plantas	Desnecessário	A ausência de escoamento de superfície permite evitar o corte das plantas. A vegetação morta não prejudica a hidráulica do leito e, além disso, constitui um isolamento térmico do próprio leito.
Outras operações	Cada visita	Manter um livro de registos, com todas as tarefas realizadas, as medições de caudal a fim de ter um bom conhecimento dos caudais e permitir a elaboração de relatórios de funcionamento.

O controlo é uma ferramenta operacional importante que proporciona dados para melhorar o rendimento do tratamento. Identifica problemas, documenta as substâncias potencialmente tóxicas antes que sejam bioacumuláveis e determina o cumprimento dos requisitos reguladores (EPA, 2000b e Morais *et al*, 2006). A identificação dos problemas atempadamente, permite uma intervenção mais rápida e eficaz. As fotografias podem ser inestimáveis, documentando estas condições, devendo tirar-se fotografias periodicamente, nas mesmas condições, localizações e com o mesmo angulo de visão. O nível e detalhe do controlo depende do tamanho e complexidade do sistema do leito, podendo mudar quando o sistema amadurece e se conhece melhor o seu comportamento.

3.7 – Vantagens dos leitos de macrófitas

Quando convenientemente dimensionados, os leitos de macrófitas oferecem um elevado número de vantagens em relação aos sistemas convencionais, por serem sistemas de baixa tecnologia, com moderado custo de investimento inicial, baixo custo de manutenção e exploração (Debusk, 1999), não necessitando de um operário permanentemente no sistema, sem custos acrescidos ao longo do seu tempo de vida útil (Santiago, 1999). Têm uma integração paisagística compatível com a crescente consciencialização ambiental, por serem sistemas de fluxo sub-superficial não apresentam

odores nem insectos e têm versatilidade de formas do leito de macrófitas, para melhor adaptação ao terreno (Mano *et al*, 2003).

Estes sistemas permitem a utilização de órgãos já existentes, como é o caso de fossas sépticas e de tanques Imhoff, dispensam equipamentos eléctricos, electromecânicos ou injecção forçada de oxigénio (Silva, 1998), não necessitam de aditivos químicos nem combustíveis energéticos. Complementam o tratamento secundário de algumas ETAR's de concepção convencional com uma afinação a nível de remoção de nutrientes e de eliminação de poluição bacteriológica (Costa *et al*, 2003), conseguem elevada eficiência no tratamento de CBO_5, SST e coliformes fecais e têm boa adaptação à variação de caudais (Galvão e Matos, 2004).

A utilização das plantas como vector de transporte de oxigénio até ao substrato apresenta uma elevada capacidade de evapo-transpiração, o que tem repercussões positivas ao nível do balanço térmico e hídrico (Santiago, 1999). Existe uma grande variedade de plantas que podem ser utilizadas no tratamento de águas residuais, conferindo aos leitos uma estética própria (Mbuligwe, 2005).

A descentralização do tratamento de águas residuais, a baixa produção de lamas (Galvão e Matos, 2004), o total aproveitamento do efluente para fins agrícolas ou outros, a boa adaptação ao clima de Portugal são mais alguns dos aspectos positivos a acrescentar a este tipo de sistemas.

Em síntese pode ainda referir-se que, os leitos de macrófitas ajudam a diminuir as emissões de CO_2 para a atmosfera, fazem o aproveitamento das energias renováveis para tratar as águas residuais (Silva, 1998). Possuem uma configuração estética e simbolismo ecológico (Mano *et al*, 2003) e são sistemas de grande longevidade que cumprem dos parâmetros da Lei da Água, Decreto-Lei nº 236/98 de 1 de Agosto (Silva, 1998).

3.8 – Limitações da aplicação dos leitos de macrófitas

A principal condicionante da utilização dos leitos de macrófitas prende-se com a dificuldade em obter terreno com área razoável para a implantação dos leitos, uma vez que necessitam de maiores áreas que os sistemas convencionais (EPA, 2000a), e em meios urbanos tornam o sistema bastante dispendioso. O rendimento destes sistemas pode ser menos constante do que num processo convencional, podendo mesmo ser estacional em resposta às mudanças das condições ambientais, incluindo chuvas e secas. Demoram algum tempo até atingirem as condições óptimas de funcionamento, aproximadamente 1 ou 2 anos após a sua implementação, podendo com o decorrer do tempo ocorrer a colmatação do leito.

Os componentes biológicos são sensíveis a substâncias como o amoníaco e os pesticidas que chegam a ser tóxicos e são sistemas que requerem uma quantidade mínima de água para sobreviver, mas não suportam estar secos. As plantas podem ser infectadas por pragas e durante o período de seca podem ser propensas a incêndios por acidente ou vandalismo.

4 – DIMENSIONAMENTO

4.1 – Introdução

A utilização dos leitos de macrófitas no tratamento secundário de águas residuais domésticas é uma alternativa que remonta aos anos 70. Desde então procuram aferir-se os parâmetros de dimensionamento que permitam a melhor depuração das águas residuais em ambientes de interface plantas-solo. Infelizmente, os critérios de dimensionamento ainda não estão contemplados em normas técnicas, dificultando deste modo a uniformização de parâmetros e critérios (Sezerino, 2005b).

Na literatura encontram-se diversos modelos ou critérios empíricos para projectar leitos de macrófitas, estando a maioria desses modelos direccionados para a remoção de matéria carbonácea. Deste modo, os leitos de macrófitas são considerados como reactores biológicos de biofilme fixo, prevendo para estes uma remoção da matéria orgânica segundo uma equação cinética de primeira ordem (Tchobanoglous *et al*, 2003).

Por se tratar de um processo de tratamento baseado num escoamento através de um meio filtrante, devem conhecer-se as características do material de enchimento do leito (granulometria, diâmetro efectivo, condutividade hidráulica, entre outras) e a lei que descreve este tipo de escoamentos. Consideram-se nestas aplicações que a Lei de Darcy é uma boa aproximação.

Não obstante este tipo de tratamento se basear na utilização de macrófitas, essa consideração não é tida em conta nos critérios de dimensionamento propostos pelos diversos autores. No entanto, a existência de plantas diminui a colmatação dos leitos e favorece a oxigenação da água residual. Por outro lado, as plantas absorvem e adsorvem matérias poluentes, removendo-as desta forma da água residual. Deste modo, a utilização de plantas macrófitas contribui para um melhor desempenho dos leitos filtrantes.

Neste capítulo apresenta-se o levantamento dos principais métodos de dimensionamento de leitos de macrófitas, nomeadamente, o método empírico e os métodos propostos por Reed, Crites e Middlebrooks, Metcalf & Eddy, Relvão e EPA (Environmental Protection Agency). Outros autores abordam esta temática, nomeadamente Vymazal (Vymazal, 2003), KicKuth (1998), Kadlec (Kadlec, 1996), mas todos estes métodos se baseiam na equação cinética de primeira ordem e na Lei de Darcy. Assim sendo, seleccionaram-se os autores acima referenciados, uma vez que Reed é uma referência pelos estudos que efectuou neste domínio, Metcalf & Eddy são considerados uma referência no tratamento de águas residuais, Relvão foi o Português mais empenhado neste tema e a EPA por ser um método ligeiramente diferente dos restantes. Quase todos os métodos recorrem aos estudos apresentados por Reed. Na parte final do capítulo é apresentado um caso de estudo, para

ilustrar a aplicação de cada um dos métodos de dimensionamento propostos e a respectiva discussão dos resultados obtidos.

4.2 – Princípios básicos

Os leitos de macrófitas, como foi referido no capítulo 3, são sistemas constituídos por pequenas depressões no terreno, ou pequenas lagoas, com o fundo impermeável, parcialmente cheias com material permeável (solo arenoso, areia grossa, gravilha fina ou areão), devendo levar em toda a superfície uma estreita camada de solo arável, na qual são plantadas espécies botânicas adaptadas à vida em terrenos encharcados: as macrófitas emergentes (Relvão 1999).

O modelo que melhor descreve o funcionamento de um leito de macrófitas de fluxo contínuo é o que equaciona um escoamento do tipo êmbolo, sendo as remoções dos contaminantes descritas por uma cinética de 1ª ordem (Reed *et al* , 1995). A partir das equações deste modelo pode determinar-se a área superficial (A_s) do leito, que se baseia no tempo de retenção hidráulica (t) e na temperatura do sistema (T).

O percurso das águas residuais através dos leitos ocorre de modo semelhante ao escoamento laminar em meios porosos. A lei de Darcy permite determinar a área da secção transversal (A_t) e as dimensões dos leitos de macrófitas (comprimento/largura) (Reed *et al* , 1995). De um modo geral, pode dizer-se que os parâmetros biológicos fornecem elementos para o cálculo da área superficial do leito, as características das plantas controlam a profundidade e as relações hidráulicas determinam a configuração do leito (Relvão, 1999).

4.2.1 – Cinética de remoção de matéria orgânica

Um dos parâmetros mais importantes no tratamento de águas residuais domésticas é a remoção de matéria orgânica. Existem vários modelos matemáticos que descrevem essa remoção, sendo um deles o modelo de reactor de fluxo contínuo com escoamento do tipo "êmbolo" (que é o modelo que mais se aproxima às reacções dum leito de macrófitas de fluxo sub-superficial). Geralmente, selecciona-se o teor em matéria orgânica, expressa na forma de CBO_5, como o parâmetro cuja remoção determina a eficiência do tratamento. Assumindo que esta remoção ocorre segundo uma cinética de 1ª ordem, a equação que descreve tal fenómeno é:

$$\frac{C_e}{C_a} = \exp(-K_T t) \qquad [4.1]$$

Onde:

C_e – concentração de CBO_5 do efluente – saída (mg/L)

C_a – concentração de CBO_5 do afluente – entrada (mg/L)

K_T – constante cinética de primeira ordem (dias^{-1})
t – tempo de retenção hidráulica (dias)

O valor de K_T pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$K_T = K_{20}\theta^{T-20} \quad [4.2]$$

Sendo:
K_{20} – constante cinética de primeira ordem (a 20ºC)
T – temperatura média de funcionamento do leito (ºC)
Θ – constante adimensional (variando conforme os autores entre 1,05 e 1,104)

O tempo de retenção hidráulica (t) pode ser calculado com base na porosidade do meio através da seguinte expressão:

$$t = n\frac{Lbh}{Q} \quad [4.3]$$

Onde:
t – tempo de retenção hidráulica (dias)
L – comprimento do leito de macrófitas (m)
b – largura do leito de macrófitas (m)
h – profundidade do leito (m)
Q – caudal médio que circula através do leito de macrófitas (m^3/d)
n – porosidade do meio (m^3 de vazios/m^3 de leito)

As expressões que permitem a determinação do volume e da área superficial dos leitos de macrófitas são deduzidas a partir das equações [4.1] e [4.3], sendo o volume útil do leito (V) calculado de acordo com o caudal, a remoção de carga orgânica e a porosidade do material a empregar no leito, através da expressão [4.4]:

$$V = \frac{Q(\ln C_a - \ln C_e)}{K_T n} \quad [4.4]$$

A área superficial do leito (A_s), obtém-se através da equação de cálculo do volume, arbitrando um valor para a espessura do leito (h), recomendando-se valores entre 0,50 m e 1,00 m, dependendo das espécies botânicas a utilizar (Reed, 1995):

$$V = A_s h \quad [4.5]$$

E,

$$A_s = Lb \quad [4.6]$$

4.2.2 – Escoamento em meios porosos

Os meios porosos são constituídos por partículas sólidas, granulares, que deixam entre si interstícios ou poros, formando pequenos canalículos através dos quais é possível o escoamento de fluidos. Neste caso considera-se o escoamento de líquidos em meios porosos tomados como incompressíveis, isto é, cuja porosidade não varia com a pressão a que está sujeito o líquido. A porosidade (n) designa a relação do volume de vazios existentes numa determinada porção do meio poroso e o volume total da mesma porção do meio (Quintela, 2000).

A diferença de cota piezométrica entre dois pontos (ou entre duas secções) de um meio poroso saturado de um líquido dá lugar ao escoamento deste. Em face das reduzidas dimensões transversais dos canalículos, o líquido circula neles com lentidão. Devido à baixa velocidade do escoamento através desses canalículos, às reduzidas dimensões transversais dos mesmos e ao valor da viscosidade da água, é de esperar que o escoamento seja laminar, vindo a velocidade proporcional à perda de carga unitária, J, à semelhança do que se passa em tubos cilíndricos, e se traduz na lei de Darcy (Quintela, 2000).

$$v = KJ \qquad [4.7]$$

Onde:
v – velocidade de escoamento (m/s)
K – permeabilidade ou condutividade hidráulica ($m^3/m^2/d$)
J – perda de carga por unidade de comprimento na direcção do escoamento, também designado por gradiente hidráulico

O conhecimento da permeabilidade é fundamental para a resolução dos problemas de escoamentos em meios porosos (Barbosa, 1998). A permeabilidade (K) de um meio depende da natureza (porosidade), da forma das partículas, do arranjo destas, bem como da viscosidade do líquido (Quintela, 2000).

A identificação do tipo de solo permite que se tenha, à partida, uma ideia da ordem de grandeza do coeficiente de permeabilidade, recorrendo a tabelas de valores como os que figuram no Quadro 4.1, relativos ao escoamento de água (Barbosa, 1998).

Quadro 4.1 – Coeficientes de permeabilidade relativos à água, em metros por segundo

Tipos de solos		Permeabilidades relativamente à água (m/s)	
		Mínima	Máxima
Argila			10^{-8}
Silte		10^{-7}	$5x10^{-6}$
Areia	Siltosa	10^{-6}	$2x10^{-5}$
	Fina	10^{-5}	$5x10^{-4}$
	Mistura	$5x10^{-5}$	10^{-4}
	Grossa limpa	10^{-4}	10^{-2}
Seixo limpo		10^{-2}	

No entanto, tem-se procurado exprimir a permeabilidade a partir da análise granulométrica dos solos ou laboratorialmente. Exemplo da expressão da permeabilidade a partir da análise granulométrica é a fórmula proposta por Hazen [4.8]:

$$\mathrm{K} = 0{,}0015 d_{10}^2 \qquad [4.8]$$

Válida para: $0{,}1\mathrm{mm} \langle \mathrm{d}_{10} \langle 3\mathrm{mm}$ e $\mathrm{d}_{60} \langle 5\mathrm{d}_{10}$

Onde:

d_{10} e d_{60} – diâmetros eficazes, que representam as dimensões das malhas dos peneiros que permitem a passagem de 10% e 60%, respectivamente, do peso da amostra peneirada.

Relativamente à determinação da permeabilidade a partir de ensaios laboratoriais, pode ser feita com permeâmetros de carga constante ou de carga variável. Estes ensaios não vão ser aqui descritos mas podem ser consultados em Barbosa (Barbosa, 1998).

Considerando que nos leitos de fluxo sub-superficial o escoamento se dá fundamentalmente perpendicularmente à secção transversal do leito, a equação da continuidade pode ser escrita da seguinte forma:

$$\mathrm{Q} = \mathrm{vA_t} \qquad [4.9]$$

Onde:
Q – caudal (m^3/d)
A_t – área da secção transversal do leito, perpendicular ao escoamento (m^2)
v – velocidade do escoamento através da secção transversal do leito (m/d)

Substituindo em [4.6] vem:

$$Q = KA_t J \qquad [4.10]$$

Onde:
K – condutividade hidráulica por unidade de superfície do meio, perpendicular ao escoamento ($m^3/m^2/d$)
J – gradiente hidráulico (m/m)

Sendo A_t a área da secção transversal do leito dada por:

$$A_t = bh \qquad [4.11]$$

b – largura do leito
h – profundidade da água no leito (m)

O comprimento dos leitos pode ser expresso a partir da área superficial (A_s) do leito, da seguinte forma:

$$L = \frac{A_s}{b} \qquad [4.12]$$

Onde:
A_s – área superficial do leito (m2)
L – comprimento do leito (m)

4.3 – Métodos de dimensionamento para a remoção de CBO_5

Baseado na equação cinética de primeira ordem que descreve a remoção da CBO_5 num tratamento biológico e na lei de Darcy que descreve os escoamentos em meios porosos, diversos autores propuseram métodos de dimensionamento para os leitos de macrófitas, nomeadamente: Método empírico, Método proposto por Reed, Crites e Middlebrooks, Metcalf & Eddy, Relvão, e EPA.

4.3.1 – Método empírico

O método empírico consiste em dimensionar a área superficial do leito considerando uma área superficial pré-estabelecida por habitante equivalente, em função do grau de tratamento que o leito deve conferir à água residual. Este método sugere valores de 4 a 6 m^2 (Belgiorno, 2002) ou simplesmente 5 m^2 (Vymazal, 2003) por habitante equivalente de área superficial quando se pretende efectuar um tratamento secundário, e 4,5 a 7 m^2 por habitante equivalente, quando se tratar de um tratamento terciário. Este método é usado essencialmente para pré-dimensionamento ou quando não se revele necessário um estudo mais apurado (Belgiorno, 2002).

4.3.2 – Método proposto por Reed, Crites e Middlebrooks

Segundo estes autores (Reed *et al*, 1995), o dimensionamento da área superficial (A_s) dos leitos de macrófitas é feito a partir da equação cinética de primeira ordem [4.5], e a largura é calculada a partir da lei de Darcy, equação [4.10] considerando que:

$$\mathrm{J} = \frac{mh}{L} \qquad [4.13]$$

Em que:
J – gradiente hidráulico (m/m)
m – percentagem que quantifica a perda de carga em função da profundidade da água no leito

h – profundidade da água no leito (m)
L – comprimento do leito (m)

O valor de m deverá variar entre 0,05 e 0,20 e a razão entre o comprimento (L) e a largura (b) de um leito, considerada mais adequada deve estar compreendida entre 1 e 4.

Assim, substituindo [4.13] em [4.10] obtém-se:

$$b = \frac{1}{h}\left[\frac{QA_s}{mK}\right]^{0,5} \qquad [4.14]$$

Por outro lado, a determinação da constante cinética de primeira ordem, K_T, obtém-se da equação [4.2], considerando θ igual a 1,06 e a constante de desoxigenação a 20ºC (K_{20}) igual a 1,104. T é a temperatura média de funcionamento do leito ($^{\circ}$C) (Reed *et al,* 1995).

$$K_T = 1{,}104\ (1{,}06^{T-20}) \qquad [4.15]$$

Reed apresenta ainda valores para a condutividade hidráulica (K) referida na equação [4.10] para as classes de materiais granulares mais usados nos leitos de macrófitas de fluxo sub-superficial apresentados no Quadro 4.2.

Quadro 4.2 – Valores da condutividade para diferentes meios

Tipo de meio	Diâmetro efectivo D10 (mm)	Porosidade (n)	Condutividade hidráulica (K) ($m^3/m^2/d$)
Areia grossa	2	0,28-0,32	100-1000
Gravilha	8	0,30-0,35	500-5000
Cascalho fino	16	0,35-0,38	1000-10000
Cascalho médio	32	0,36-0,40	10000-50000
Cascalho grosseiro	128	0,38-0,45	50000-250000

Reed limita ainda o valor da velocidade do efluente a 6,8 m/d, para minimizar o arrastamento de biofilmes (Reed *et al*, 1995).

4.3.3 – Método proposto por Metcalf & Eddy

O método de dimensionamento apresentado por Metcalf & Eddy (Metcalf & Eddy, 1995) baseia-se nos mesmos princípios do método proposto pelo autor anterior, utilizando a equação [4.1] da cinética de remoção dos contaminantes, para determinar o tempo de retenção hidráulica (t) e a equação [4.3] que, resolvida em ordem a L, permite determinar o comprimento do leito.

Este autor propõe que se utilizem os valores da condutividade hidráulica e da constante de cinética de primeira ordem a 20ºC (K_{20}) para o tipo de meios mais usados nos leitos de macrófitas de fluxo sub-superficial horizontal e que se apresentam no Quadro 4.3.

Quadro 4.3 – Características típicas do meio dos leitos de macrófitas (EPA 625/1-88-0229)

Constituição do leito	Diâmetro efectivo D_{10}(mm)	Porosidade (n)	Condutividade hidráulica (K) ($m^3/m^2/d$)	K_{20}
Areia média	1	0,42	420	1,84
Areia grossa	2	0,39	480	1,35
Gravilha	8	0,35	499	0,86

A constante da temperatura, K_T, é dada pela equação [4.2], com θ a assumir o valor de 1,1 e a área da secção transversal (A_t) é estabelecida pela capacidade hidráulica requerida, de acordo com a equação [4.10]. O autor propõe que se adopte para o gradiente hidráulico um valor igual ao da inclinação do leito. Este autor utiliza a mesma limitação máxima de velocidade definida por Reed (Reed, 1995) de 6,8 m/dia. A largura do leito é função da área da secção transversal e da profundidade, sendo calculada através da equação [4.11]. A área superficial (A_s) é calculada utilizando a equação [4.12].

As principais diferenças deste método relativamente ao método proposto por Reed residem no valor da constante cinética de primeira ordem, de θ e dos valores apresentados para a condutividade.

4.3.4 – Método proposto por Relvão

Também este autor baseia o seu dimensionamento na equação cinética de primeira ordem e na lei de Darcy, [4.2] e [4.5]. Tal como no método anterior, as principais diferenças encontram-se nos valores adoptados para a constante cinética de primeira ordem (K_{20}) e de θ. Relvão propõem que os valores a adoptar para K_{20} sejam os citados por Conley e Lucy M. (Relvão, 1999), apresentados no Quando 4.4. Este autor considera ainda que θ deve assumir o valor de 1,06.

Quadro 4.4 – Valores da constante K_{20} para vários meios e tempos de retenção

Meio de enchimento	K_{20}	Tempo de retenção (d)
Misto	0,64	4,9
Misto (juncos)	0,7	6
Misto (n=0,35)	0,76	4,6
Solo misto	0,93	9,6
Areão	0,98	2,1
Gravilha calcária	0,98	2
Misto	1,03	4,1

Relativamente ao valor da condutividade, Relvão afirma que a condutividade do leito saturado (K) é função do tipo de meio utilizado, podendo ter valores compreendidos entre os 41 m/d para a areia e os 4100m/d para a gravilha grossa (Relvão, 1999).

O autor propõe que se adopte para o gradiente hidráulico um valor igual ao da inclinação do leito (entre 0,5 a 1,5%). Por outro lado, sugere que se adoptem velocidades superficiais abaixo de 8,0 m/d.

4.3.5 – Método proposto pela EPA (Environmental Protection Agency)

A Environmental Protection Agency considera que os leitos de macrófitas estão divididos em quatro zonas, a entrada, a saída, e duas zonas intermédias (zona 1 e zona 2), que constituem a zona de tratamento, conforme se exemplifica na figura 4.1 (EPA, 2000a).

A zona da entrada tem um comprimento de cerca de 2 metros, preenchido por cascalho grosso, com 40 a 80 mm de diâmetro para minimizar o risco de colmatação. É nesta zona que se efectua a distribuição do efluente no leito.

A zona 1 situa-se a seguir à zona de entrada, ocupa cerca de 30% da zona de tratamento do leito, realizando-se aqui a maior parte do tratamento. É a zona com maior decréscimo da condutividade hidráulica.

A zona 2 ocupa cerca de 70% da zona de tratamento do leito, situa-se antes da zona de saída e é onde ocorre o tratamento final e tem um pequeno decréscimo da condutividade hidráulica.

A zona da saída tem o valor fixo de 1 metro de comprimento, é preenchida por cascalho grosso, idêntico ao da zona de entrada. É o local onde o efluente tratado vai ser captado para posterior descarga no meio receptor (Figura 4.1).

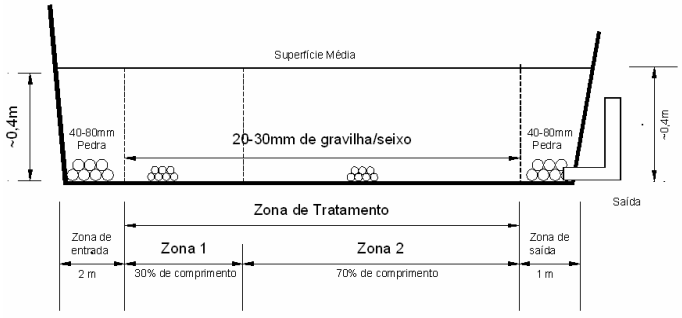

Figura 4.1 - Esquema de leito de macrófitas

Definidas as várias zonas constituintes do leito, o dimensionamento da sua área superficial não é feito de acordo com a expressão [4.4] mas a partir da expressão [4.17], que não obstante não ter a mesma forma se baseia nos mesmos princípios. A partir da expressão [4.17] a área superficial do leito é

determinada em função do caudal e concentração, à entrada, do parâmetro considerado relevante para o dimensionamento (CBO_5, SST, N ou P) e taxa de remoção desse mesmo parâmetro.

$$A_s = \frac{QC_a}{(ARL)} \qquad [4.17]$$

Sendo:
Q = caudal afluente (m^3/dia)
C_a = concentração de CBO_5 do afluente à entrada (mg/L)
ALR = taxa de remoção por unidade de área ($g/m^2/d$)

Os valores de ALR recomendados de acordo com a qualidade desejada para o efluente à saída estão indicados no Quadro 4.5:

Quadro 4.5 – Valores de ALR

Parâmetro	ALR (g/m2/d)	Qualidade do efluente à saída (mg/L)
CBO	6	30
CBO	1,6	20
SST	20	30

Para determinar a área transversal do leito utiliza-se a lei de Darcy, [4.10] a partir da qual é possível calcular a largura (b) do leito [4.21]. O índice 1 refere-se à zona 1 de tratamento, cuja área superficial representa 30% da área da zona de tratamento.

$$b = \sqrt{\frac{QA_{s1}}{K_1 J_1 h_e}} \qquad [4.21]$$

K_1 – condutividade hidráulica por unidade de superfície do meio, perpendicular ao escoamento na zona 1 ($m^3/m^2/d$)
J_1 – gradiente hidráulico da zona 1 (m/m)
h_e – profundidade da água na zona de entrada

A EPA (EPA, 2000a) recomenda que o comprimento mínimo dos leitos seja de 15 m e a largura máxima de 61 m. A inclinação da base do leito deve estar compreendida 0,5 e 1,0% e topo nivelado. Para efeitos de cálculo deve considerar-se uma condutividade hidráulica igual a 1% da condutividade total do meio, na zona 1 e de 10% na zona 2.

Relativamente ao enchimento do leito, o mesmo documento recomenda as granulometrias indicadas no Quadro 4.6 de acordo com as diferentes zonas do leito.

Quadro 4.6 – Enchimento do leito

Zona	Granulometria (mm)
Zonas de entrada e de saída	40 a 80
Zona de tratamento (zonas 1 e 2)	20 a 30
Zona de plantação (Primeiros 10 cm)	5 a 20

4.4. – Aplicação prática

Após análise dos critérios atrás propostos, exemplifica-se através de um exercício tipo, os cálculos conducentes ao dimensionamento de um leito de macrófitas, utilizando os critérios propostos pelos autores que foram alvo de estudo neste trabalho.

No Quadro 4.7 apresentam-se os valores dos parâmetros a considerar nesta aplicação prática do dimensionamento do leito de macrófitas:

Quadro 4.7 – Dados dos parâmetros do sistema a dimensionar

Parâmetros	Unidades	Valores
População	Habitantes	300
Caudal de dimensionamento (Q)	m^3/dia	36
Concentração de CBO_5 à entrada do leito (C_a)	mg/L O_2	315
Concentração de CBO_5 à saída do leito (C_e)	mg/L O_2	40
Porosidade (n)	m^3vazios/m^3leito	0.35
Profundidade do leito (h)	m	0.60
Temperatura média de funcionamento (T)	ºC	12
Inclinação do leito (i)	%	1

4.4.1 – Método Empírico

Utilizando o método empírico obter-se-ia uma área superficial entre 1200 e 1800 m^2, considerando uma área de 4 a 6 m^2 por habitante equivalente, uma vez que a população é de 300 habitantes.

4.4.2 – Método proposto por Reed, Crites e Middlebrooks

Assumindo que a temperatura média de funcionamento do leito é de 12ºC, calcula-se a constante cinética de primeira ordem (K_T) através da equação [4.2], considerando θ igual a 1,06 e K_{20} igual a 1,104:

$$K_T = K_{20}(1{,}06)^{(T-20)} = 1{,}104 \times (1{,}06)^{(12-20)} = 0{,}69 \quad d^{-1}$$

Para determinar a área superficial necessária para o leito utilizam-se as equações [4.5], [4.6] e [4.7]

$$A_s = \frac{Q(\ln C_a - \ln C_e)}{K_T h n} = \frac{36 \times (\ln 315 - \ln 30)}{0{,}69 \times 0{,}6 \times 0{,}35} = 585 \quad m^2$$

Utilizando as equações [4.12] e [4.14], com m=0,06 (considerando m igual a 10% de h), Q = 36 m^3/d, sendo o K parcial 5000 m^3/m^2, valor obtido do Quadro 4.1, tem-se:

$$b = \frac{1}{h}\left[\frac{QA_s}{mK}\right]^{0,5} = \frac{1}{0{,}6}\left[\frac{36 \times 585}{0{,}06 \times 5000}\right]^{0,5} = 14 \quad m$$

$$L = \frac{585}{14} = 42 \quad m$$

A relação comprimento/largura assume um valor próximo de 3, valor compreendido no intervalo proposto pelo autor (1 a 4) como sendo o aconselhado.

A velocidade de escoamento numa direcção perpendicular à secção transversal do leito é da ordem dos 4,6 m/d, inferior ao limite máximo preconizado por Reed *et al* (6,8 m/d).

4.4.3 – Metcalf & Eddy

Os valores de K e K_{20} a ser utilizados nesta situação foram retirados do Quadro 4.2, com:

K = 499 $m^3/m^2/d$
K_{20} = 0.86

A determinação da Área de Secção Transversal (A_t) efectua-se através da equação [4.10], com J a assumir o valor da inclinação do leito, ou seja, 1%:

$$A_t = \frac{Q}{KJ} = \frac{36}{499 \times 0{,}01} = 7{,}2 \quad m^2$$

Determinação da largura (b) calculada através da equação [4.11]:

$$b = \frac{A_t}{h} = \frac{7{,}2}{0{,}6} = 12 \quad m^2$$

Determinação do valor de K_T a 12ºC utilizando a equação [4.2], com θ igual a 1,1.

$$K_T = K_{20}(1{,}1)^{(T-20)} = 0{,}86 \times (1.1)^{(12-20)} = 0{,}4 \quad \text{d}^{-1}$$

Determinação do tempo de retenção do efluente no meio poroso (t) através da equação [4.1] resolvida em ordem a t:

$$t = \frac{-\ln\left(\frac{C_e}{C_a}\right)}{K_T} = \frac{-\ln\left(\frac{30}{315}\right)}{0{,}4} = 5{,}9 \quad \text{d}$$

O comprimento (L) é calculado a partir da equação [4.3] resolvida em ordem a L:

$$L = \frac{tQ}{bhn} = \frac{5{,}9 \times 36}{12 \times 0{,}6 \times 0{,}35} = 85 \quad \text{m}$$

A Área Superficial (A_s) do leito é dada pelo produto de comprimento pela largura, equação [4.12]:

$$A_s = b.L = 12 \times 85 = 1020 \quad \text{m}^2$$

A velocidade de escoamento numa direcção perpendicular à secção transversal do leito é da ordem dos 5,0 m/d, inferior ao limite máximo preconizado (6,8 m/d).

4.4.4 – Relvão

Tendo em atenção que o leito é misto e tem uma porosidade de 0,35, Relvão considera o valor de K_{20} igual a 0,76 (Quadro 4.4).

Considerando θ igual a 1,06, para uma temperatura de 12ºC:

$$K_T = 0{,}76 \times (1{,}06)^{(12-20)} = 0{,}48 \quad \text{d}^{-1}$$

Sabendo que a profundidade do leito é de 0,6m e a porosidade n = 0,35, usando a equação [4.4] obtém-se a área superficial:

$$A_s = \frac{Q(\ln C_a - \ln C_e)}{K_T hn} = \frac{36 \times (\ln 315 - \ln 30)}{0{,}48 \times 0{,}6 \times 0{,}35} = 840 \quad \text{m}^2$$

Para o meio utilizado neste exemplo, Relvão aconselha a utilização do valor 400 m/dia para a condutividade hidráulica e considera o gradiente hidráulico (J) igual à inclinação da base do leito (1%). A área da secção transversal (A_t) pode ser determinada pela equação [4.5]:

$$A_t = \frac{Q}{KJ} = \frac{36}{400 \times 0{,}01} = 9 \quad \text{m}^2$$

$$b = \frac{9}{0{,}6} = 15 \quad \text{m}$$

$$L = \frac{840}{15} = 56 \quad \text{m}$$

A relação comprimento/largura assume um valor próximo de 3,3. A velocidade de escoamento numa direcção perpendicular à secção transversal do leito é da ordem dos 4,0 m/d, inferior ao limite máximo preconizado (8 m/d).

4.4.5 – EPA

Determinação da área superficial (A_s) em função da concentração de CBO_5 à entrada e da qualidade desejada à saída 30 mg/L de CBO_5.

$$A_s = \frac{QC_0}{K_{CBO}} = \frac{36 \times 315}{6} = 1890 \quad \text{m}^2$$

A área superficial da zona inicial de tratamento (A_{s1}) é 30% da área superficial:

$$A_{s1} = 30\% \times 1890 = 567 \quad \text{m}^2$$

A área superficial da zona final de tratamento (A_{s2}) é 70% da área superficial:

$$A_{s2} = 70\% \times 1890 = 1323 \quad \text{m}^2$$

Determinação da largura, b, usando a equação [4.21] considerando:

K_1 – 1%x100000 = 1000
J_1 – 10%xh_m = 10%x0,6 = 0,06
h_e – 0,4 m

$$b^2 = \frac{36 \times 567}{1000 \times 0{,}06 \times 0{,}4} = 850{,}5 \quad \text{m}^2$$

$$b = 30 \quad \text{m}$$

Esta é a largura determinada para os parâmetros que foram definidos. Deve optar-se por uma largura superior ou igual a esta.

Para determinar o comprimento da zona inicial de tratamento, através da lei de Darcy:

$$L_1 = \frac{A_{s1}}{b} = \frac{567}{30} = 19 \quad \text{m}$$

Para determinar o comprimento da zona final de tratamento, utiliza-se a seguinte equação:

$$L_2 = \frac{A_{s2}}{b} = \frac{1323}{30} = 45 \quad \text{m}$$

A relação comprimento/largura assume um valor próximo de 2,1.

4.4.6 – Comparação dos métodos apresentados

Todos os critérios anteriormente apresentados utilizam para o dimensionamento dos leitos de macrófitas a Lei de Darcy, pois consideram que através dela se obtém uma boa aproximação das condições hidráulicas dos leitos de fluxo sub-superficial. É a partir da Lei de Darcy que se determinam as dimensões da secção transversal do leito.

Todos os autores, excepto a EPA (EPA, 2000a) apresentam para a determinação da área superficial dos leitos, um modelo baseado na equação cinética de primeira ordem que descreve um reactor biológico de fluxo contínuo de escoamento tipo "êmbolo", para remover a matéria orgânica. No entanto, a expressão proposta pela EPA, não obstante não ter a mesma forma baseia-se nos mesmos princípios, ou seja, considera no cálculo da área superficial do leito o caudal, a concentração do parâmetro considerado relevante para o dimensionamento (CBO_5, SST, N e P) e taxa de remoção desse parâmetro.

As diferenças encontradas entre os métodos apresentados por Reed *et al,* Relvão e Metcalf & Eddy centram-se nos valores utilizados para a constante cinética de primeira ordem (K_T) utilizada (equação 4.2), uma vez que θ assume valores diferentes, consoante o autor. O cálculo do mesmo exercício através dos critérios descritos pelos diversos autores referidos neste trabalho resultou nas dimensões apresentadas no Quadro 4.8.

Quadro 4.8 – Dimensões dos leitos de macrófitas

Método de dimensionamento	Área superficial (m^2)	Comprimento (m)	Largura (m)	Área/Hab (m^2/hab)	Relação comprimento/largura	Variação em relação à menor área
Empírico	1200 a 1800			4,0 a 6,0		1,34 a 2,51
Reed	585	42	14	2,0	3,0	0,00
Metcalf & Eddy	1020	85	12	3,4	6,1	0,74
Relvão	840	56	15	2,8	3,2	0,44
EPA	1890	64	30	6,3	2,2	2,23

A análise do Quadro 4.8 permite concluir que as dimensões obtidas através do método Empírico e do método proposto pela EPA se afastam bastante das restantes, apresentando dimensões muito superiores às obtidas pelos outros métodos. No primeiro caso, atendendo a que é um método empírico, o coeficiente de segurança deverá ser superior aos dos outros métodos que utilizam cálculos mais detalhados, pelo que já era expectável este resultado. No caso da EPA, essa diferença resulta de não se considerar no dimensionamento a equação cinética de primeira ordem e assumir que o leito não está todo sujeito às mesmas condições hidráulicas, distinguindo duas zonas diferentes de tratamento com condutividades hidráulicas distintas.

5 – CASOS DE ESTUDO

5.1 - Introdução

Neste capítulo descreve-se o estudo efectuado a vários sistemas de leitos de macrófitas em funcionamento em Portugal, no que respeita à eficiência de CBO, CQO, SST, P e N, no tratamento de águas residuais domésticas. Com este objectivo foram contactadas diversas entidades gestoras, na sua maioria Municípios, responsáveis pela gestão deste tipo de ETAR's. Inicialmente pretendia-se um estudo em que se avaliariam os seguintes aspectos: tipo de plantas utilizadas, método de dimensionamento mais utilizado e eficiente, análise de diversos parâmetros característicos das águas residuais, influência climática, e que acabou por não ser totalmente exequível devido à escassa dispersão geográfica dos sistemas, à limitada diversidade de plantas utilizadas e aos insuficientes dados de monitorização. Assim, apenas foi possível avaliar algumas características: área ocupada pelo sistema, área dos leitos, custo total, custo por habitante e avaliação de alguns parâmetros físico-químicos, entre outros, que podem ajudar a fazer o levantamento dos principais problemas observados para os quais se propõem soluções com vista à sua correcção ou minimização. De referir ainda que foi muito difícil a obtenção dos dados sendo que, muitos dos municípios contactados não responderam.

Este capítulo vai subdividir-se em duas partes distintas de acordo com o tipo de estudo a efectuar. O primeiro estudo corresponde à caracterização de 10 sistemas de leitos de macrófitas, onde foi efectuada a monitorização regular da qualidade das águas residuais, antes e depois do tratamento, relativamente aos parâmetros CBO_5, CQO, SST, N, P e pH. Deste modo, pretende-se verificar se, na prática, estes sistemas apresentam a eficiência e a eficácia descrita na bibliografia.

1. Sistema de Boaventura – Madeira
2. Sistema de Barroca d' Alva – Alcochete
3. Sistema de Aranhas – Penamacor
4. Sistema de Anobra – Condeixa
5. Sistema de Gonçalo – Guarda
6. Sistema de S. Pedro d'Alva – Penacova
7. Sistema de Rossas – Vieira do Minho
8. Sistema de Salamonde 2 – Vieira do Minho
9. Sistema de Salvador – Penamacor
10. Sistema do Penedo – Vila de Rei

O segundo estudo abrange mais 10 sistemas que, embora não possuam muitos valores de análises de parâmetros físico-químicos, conseguem fornecer outro tipo de informação relevante para este estudo, nomeadamente, o ano de entrada em funcionamento, o número de habitantes servidos, as áreas ocupadas (na totalidade e relativas aos leitos propriamente ditos), as espécies de plantas

utilizadas, o custo por habitante, o custo por m^2, os critérios de dimensionamento, as manutenções efectuadas, o número de leitos, a autoria do projecto e da execução.

11. Sistema de Salamonde 1 – Vieira do Minho
12. Sistema de Adiça – Tondela
13. Sistema de Vale – Tondela
14. Sistema da Póvoa das Forcadas – Carregal do Sal
15. Sistema do Malavado – Odemira
16. Sistema do Castelejo – Santa Comba Dão
17. Sistema de Erada – Covilhã
18. Sistema de Casal de Frade – Arganil
19. Sistema de Grada – Mealhada
20. Sistema do Lousal – Grândola

Na Figura 5.1 está representada, sobre o mapa de Portugal, a localização dos sistemas estudados. Esta representação está feita através da numeração que lhes foi atribuída, e tem por objectivo uma melhor percepção da sua distribuição geográfica.

Figura 5.1 – Mapa de Portugal com a localização dos sistemas de leitos de macrófitas

5.2 – Caracterização dos sistemas

A caracterização de cada um dos sistemas de macrófitas foi feita a partir de dados obtidos junto das entidades gestoras e dos contactos estabelecidos com os Técnicos responsáveis pelos sistemas, de Dezembro 2004 a Julho de 2007. Registou-se a maior quantidade de informação possível, apresentando-se em anexo o modelo do questionário efectuado às entidades gestoras (Anexo 2).

De um modo geral os sistemas de leitos de macrófitas apresentam uma obra de entrada, onde é efectuada a gradagem, para remoção dos sólidos de maiores dimensões e demais resíduos que não devem entrar nas ETAR's, seguindo-se uma fossa séptica ou um tanque Imhoff, que permite remover sobretudo grande parte dos sólidos em suspensão e efectuar o tratamento primário. Depois, o efluente a tratar segue para o leito de fluxo sub-superficial horizontal, na sua maioria com 1 ou 2 leitos de macrófitas, onde se realiza o tratamento secundário, sendo posteriormente descarregado no meio receptor.

A Figura 5.2 pretende esquematizar a disposição típica dos vários órgãos dos sistemas de leitos de macrófitas.

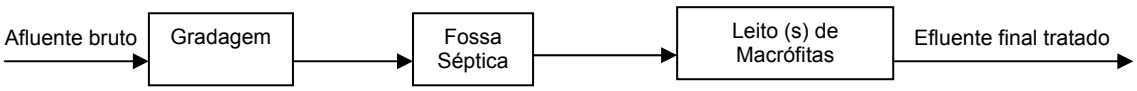

Figura 5.2 – Esquema tipo de um sistema de leito de macrófitas

De seguida descreve-se cada um dos 10 sistemas a analisar constando dessa descrição a identificação, a localização, o modo de implementação, a operação, a manutenção e dados de monitorização. Nos quadros onde são apresentados os valores dos parâmetros monitorizados, estão assinalados a "negrito" os valores que ultrapassam os limites legais de cada um dos parâmetros monitorizados.

5.2.1 – Sistema da Madeira (ETAR de Boaventura)

Este sistema pertence ao concelho de S. Vicente, freguesia de Boaventura, arquipélago da Madeira. Foi projectado pela Câmara Municipal e construído em 2003 pela Direcção Regional de Saneamento Básico, para servir 200 habitantes. É composto por três leitos de macrófitas, cada um utilizando plantas diferentes, *Typhas, Phragmites e Juncus*, com vista a efectuar um estudo comparativo da eficiência do sistema de acordo com cada uma destas espécies. Os efluentes, bruto e tratado, são monitorizados mensalmente e a manutenção efectuada à limpeza da grelha de entrada e ao corte das plantas.

A Figura 5.3 mostra uma perspectiva geral do sistema e dos e leitos de macrófitas em pormenor.

Figura 5.3 – Sistema de Boaventura – Madeira

No Quadro 5.1 estão registados os valores do efluente relativos a CBO_5 tendo-se designado por (E) o efluente à entrada do sistema, antes da fossa séptica (cor cinza) e por (S) o efluente à saída do leito de macrófitas (cor amarela), relativos aos leitos de *Phragmites, Typhas* e *Juncus*. Esta designação passa a ser utilizada em todos os quadros dos sistemas abordados.

Quadro 5.1 – Monitorização de CBO_5 do sistema da Madeira

Datas	CBO_5 (E) (mg/L O_2)	CBO_5 (S) *Phragmites* (mg/L O_2)	CBO_5 Ef. (%)	CBO_5 (S) *Typhas* (mg/L O_2)	CBO_5 Ef. (%)	CBO_5 (S) *Juncus* (mg/L O_2)	CBO_5 Ef. (%)
Fev-04	1	1	0	1	0	1	0
Mar-04	1	2	-100	0	100	1	0
Abr-04	1	3	-200	1	0	1	0
Mai-04	2	2	0	1	50	2	0
Jun-04	3	4	-33	…		4	-33
Jul-04	3	4	-33	3	0	4	-33
Ago-04	3	5	-67	…		…	
Set-04	4	5	-25	…		…	
Out-04	1	1	0	1	0	2	-100
Nov-04	2	3	-50	1	50	2	0
Dez-04	1	2	-100	…		…	
Fev-05	19	1	95	0	100	0	100
Mar-05	49	1	98	2	96	1	98
Abr-05	92	3	97	2	98	3	97
Mai-05	210	4	98	3	99	…	
Jun-05	230	5	98	5	98	0	100
Jul-05	52	4	92	3	94	4	92
Ago-05	52	4	92	3	94	4	92
Set-05	34	8	76	…		…	
Out-05	44	15	66	…		12	73
Fev-06	185	12	94	12	94	6	97
Mar-06	720	8	99	8	99	7	99
Abr-06	210	34	84	12	94	18	91
Mai-06	180	…		…		31	83
Jun-06	420	15	96	23	95	16	96
Ago-06	230	…		…		9	96
Set-06	205	11	95	…		7	97
Out-06	170	11	94	7	96	7	96
Nov-06	120	7	94	5	96	3	98
Dez-06	165	10	94	4	98	3	98
Fev-07	150	24	84	42	72	25	83
Mar-07	135	19	86	13	90	20	85
Mai-07	80	8	90	6	93	7	91
Média	171	10	91	9	94	9	93
DesvPad	154	8	8	10	6	9	7

Da análise do Quadro 5.1, pode concluir-se que este sistema depois de ter entrado em funcionamento só começou a operar eficazmente passado um ano, ou seja, a partir de Fevereiro de 2005, razão pela qual as médias que constam do quadro estarem calculadas entre Fev-05 e Mai-07, obtendo-se valores muito bons de eficiência: 91% para as *Phragmites,* 94% para as *Typhas* e 93% para os *Juncus*. A Figura 5.4 apresenta a evolução de CBO_5 em relação aos tipos de plantas utilizadas.

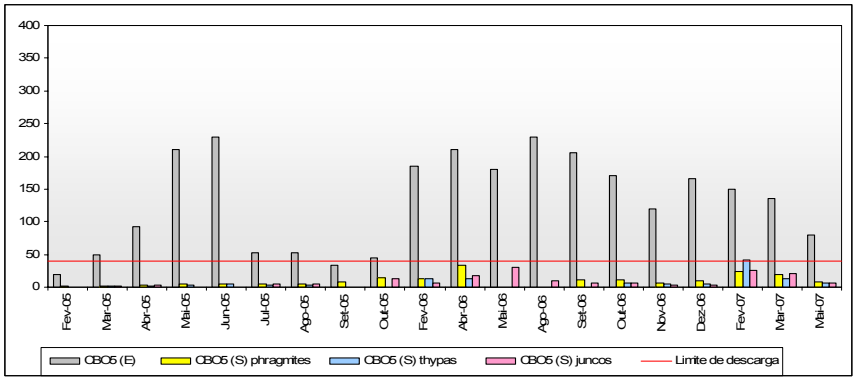

Figura 5.4 – Evolução de CBO_5 (Madeira)

Os resultados obtidos à saída dos leitos de macrófitas são muito bons, cumprindo os valores limite de descarga para qualquer um dos tipos de plantas utilizados.

Considerando o mesmo período anteriormente referido, para a avaliação de CQO, obtiveram-se médias de eficiência de 76% para as *Phragmites*, 76% para as *Typhas* e 80% para os *Juncus*.

No gráfico da Figura 5.5 e no Quadro 5.2 estão registados os valores obtidos para CQO no período estudado.

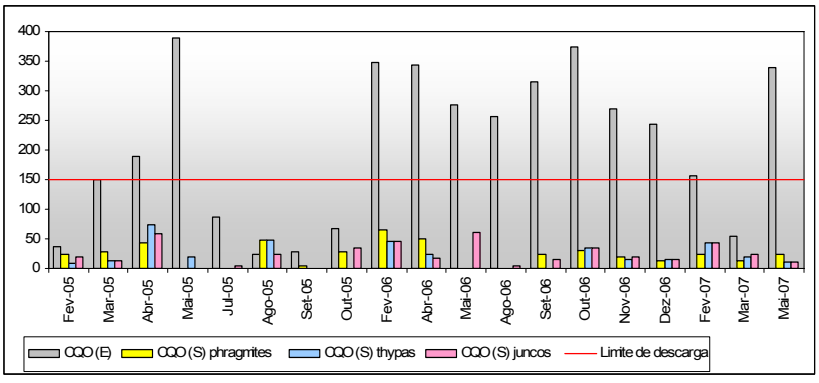

Figura 5.5 – Evolução de CQO (Madeira)

Quadro 5.2 – Monitorização de CQO do sistema da Madeira

Datas	CQO (E) (mg/L O_2)	CQO (S) *Phragmites* (mg/L O_2)	CQO Ef. (%)	CQO (S) *Typhas* (mg/L O_2)	CQO Ef. (%)	CQO (S) *Juncus* (mg/L O_2)	CQO Ef. (%)
Fev-04	10	10	0	14	-40	14	-40
Mar-04	5	…		0	100	…	
Abr-04	5	5	0	15	-200	5	0
Mai-04	5	5	0	15	-200	5	0
Jun-04	5	5	0	…		5	0
Jul-04	28	9	68	14	50	32	-14
Ago-04	5	5	0	…		…	
Set-04	10	24	-140	5	50	…	
Out-04	9	24	-167	19	-111	5	44
Nov-04	10	5	50	0	100	15	-50
Dez-04	14	5	64	5	64	…	
Jan-05	5	10	-100	10	-100	14	-180
Fev-05	38	24	37	9	76	19	50
Mar-05	151	28	81	14	91	14	91
Abr-05	190	44	77	73	62	58	69
Mai-05	390	0	100	19	95	…	
Jun-05	590	15	97	10	98	15	97
Jul-05	88	0	100	…		5	94
Ago-05	24	48	-100	48	-100	24	0
Set-05	29	5	83	…		…	
Out-05	68	29	57	…		34	50
Fev-06	348	66	81	45	87	45	87
Mar-06	2052	59	97	25	99	34	98
Abr-06	344	49	86	25	93	18	95
Mai-06	277	…		…		61	78
Jun-06	630	30	95	15	98	41	93
Ago-06	257	…		…		5	98
Set-06	315	25	92	…		15	95
Out-06	374	30	92	35	91	35	91
Nov-06	269	20	93	15	94	20	93
Dez-06	244	13	95	15	94	15	94
Fev-07	157	25	84	44	72	44	72
Mar-07	54	13	76	20	63	25	54
Mai-07	340	25	93	10	97	10	97
Média	329	27	76	26	76	27	80
DesvPad	420	18	44	18	48	16	25

Os resultados finais de CQO para o efluente tratado também são muito bons, para qualquer um dos leitos de macrófitas, abaixo dos 150 mg/L O_2, limite legal estabelecido.

Também em relação aos SST se consideraram os dados de monitorização entre Fev-05 e Mai-07, tendo-se obtido médias de eficiência de 76% para as *Phragmites*, 85% para as *Typhas* e 83% para os *Juncus* (Quadro 5.3).

Quadro 5.3 – Monitorização de SST do sistema da Madeira

Datas	SST (E) (mg/L)	SST (S) *Phragmites* (mg/L)	SST Ef. (%)	SST (S) *Typhas* (mg/L)	SST Ef. (%)	SST (S) *Juncus* (mg/L)	SST Ef. (%)
Fev-04	9	8	11	10	-11	9	0
Mar-04	10	6	40	9	10	13	-30
Abr-04	9	3	67	2	78	2	78
Mai-04	8	5	38	3	63	5	38
Jun-04	13	6	54	…		3	77
Jul-04	60	6	90	7	88	9	85
Ago-04	10	8	20	…		…	
Set-04	5	5	0	4	20	…	
Out-04	5	3	40	5	0	6	-20
Nov-04	11	9	18	5	55	7	36
Dez-04	13	6	54	4	69	…	
Jan-05	10	12	-20	8	20	10	0
Fev-05	26	6	77	5	81	5	81
Mar-05	73	11	85	10	86	11	85
Abr-05	59	11	81	4	93	5	92
Mai-05	350	30	91	13	96	…	
Jun-05	424	22	95	6	99	6	99
Jul-05	84	17	80	12	86	6	93
Ago-05	21	20	5	11	48	11	48
Set-05	76	28	63	…		…	
Out-05	66	30	55	…		17	74
Fev-06	145	16	89	13	91	18	88
Mar-06	2243	38	98	30	99	…	
Abr-06	284	…		21	93	30	89
Mai-06	328	…		…		24	93
Jun-06	1130	13	99	18	98	18	98
Jul-06	26	…		…		13	50
Set-06	152	…		…		12	92
Out-06	104	20	81	18	83	12	88
Nov-06	210	44	79	46	78	46	78
Dez-06	220	11	95	13	94	12	95
Fev-07	104	23	78	42	60	21	80
Mar-07	88	30	66	11	88	13	85
Mai-07	104	48	54	23	78	38	63
Média	287	23	76	17	85	17	83
DesvPad	497	12	22	12	14	11	15

Os valores dos SST, para qualquer um dos leitos plantados, respeitam os limites de descarga legais, indicando um bom funcionamento do sistema.

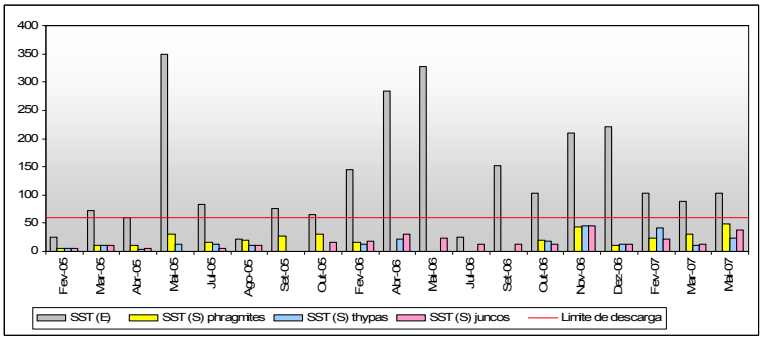

Figura 5.6 – Evolução de SST (Madeira)

Na generalidade, constata-se que os resultados apresentados são muito bons para os parâmetros analisados, obtendo-se como média final (incluindo as eficiências de CBO_5, CQO e SST) 81% para as *Phragmites*, 85% para as *Typhas* e 85% para os *Juncus*. Do período analisado pode concluir-se que as *Typhas* e os *juncos* apresentam um desempenho superior em relação às *Phragmites*. Uma vez que essa diferença não é muito relevante, este não será um factor decisivo para se fazer a escolha definitiva do tipo de planta a utilizar.

5.2.2 – Sistema de Alcochete (ETAR de Barroca d' Alva)

Sistema projectado e executado pela empresa Etarplan, para 500 habitantes, ocupando uma área de 4000 m^2, em que são utilizadas plantas do tipo *Phragmites* e com um custo total do sistema de 189.500 euros. Situado no município de Alcochete, distrito de Setúbal, insere-se num ambiente urbano, com características rurais e está em funcionamento desde 2001. Tem como órgão de tratamento primário uma fossa séptica que recebe apenas efluentes domésticos. São efectuadas análises anualmente; a manutenção incide fundamentalmente na grelha de entrada e na desobstrução das tubagens do leito. Na Figura 5.7 pode ver-se o aspecto geral dos leitos de macrófitas do sistema de Alcochete.

Figura 5.7 – Sistema de leitos de macrófitas de Alcochete (2003)

Este sistema distingue-se dos restantes por possuir 4 leitos de *Phragmites*, onde é efectuado o tratamento secundário do efluente líquido, e 3 leitos também com *Phragmites*, destinados ao tratamento das lamas provenientes da fossa séptica. Estes leitos são impermeabilizados, para evitar a contaminação do solo, havendo necessidade de os substituir após alguns anos, devido à acumulação das lamas.

No Quadro 5.4 podem ver-se os parâmetros físico-químicos globais deste sistema, com indicação dos valores do efluente à entrada da fossa séptica e à saída do leito onde se realiza o tratamento secundário, bem como as respectivas eficiências.

Quadro 5.4 – Parâmetros físico-químicos globais do sistema de Alcochete

Datas	CBO_5 (E) ($mg/L\ O_2$)	CBO_5(S) ($mg/L\ O_2$)	CBO_5 Ef. (%)	CQO (E) ($mg/L\ O_2$)	CQO (S) ($mg/L\ O_2$)	CQO Ef. (%)	SST (E) (mg/L)	SST (S) (mg/L)	SST Ef. (%)
Out-02	80	25	69	174	50	71	26	26	0
Mar-03	160	**100**	38	370	**210**	43	118	56	53
* Nov-03	96	5	95	3900	**1200**	69	119	17	86
Mar-05	83	4	95	450	76	83	10	2	80
Out-06	68	31	54	150	56	63	37	16	57
Média	97	33	70	1009	318	66	62	23	55
DesvPad	36	39	25	1621	497	15	52	20	34

* Os valores de Nov-03 não entraram no cálculo da média, por se tratar de um valor anormal, uma vez que a relação CBO_5/CQO deveria estar entre valores 0,6 a 0,7 e neste caso tem o valor de 0,02.

A eficiência de redução dos diferentes parâmetros é satisfatória, com médias entre 55 e 70%. Verifica-se, por vezes, que o efluente não consegue cumprir os parâmetros legais de descarga (Quadro 3.1 do capítulo 3), com excepção dos SST, cuja eficiência tem vindo a aumentar ao longo do tempo, respeitando os valores limites de descarga assinalados nos gráficos das Figuras 5.8, 5.9 e 5.10.

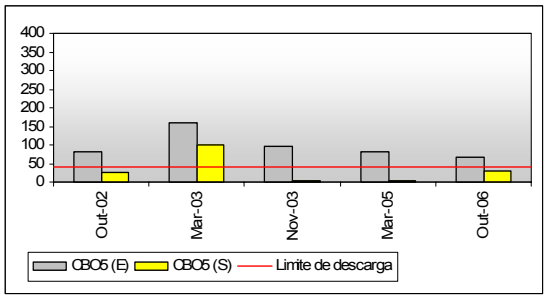

Figura 5.8 – Evolução de CBO_5 (Alcochete)

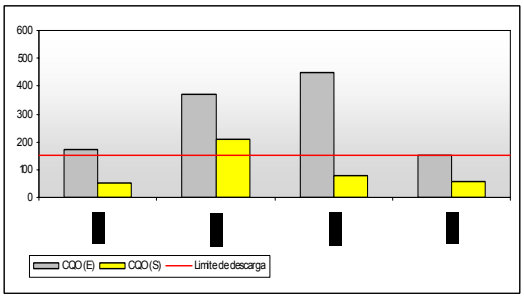

Figura 5.9 – Evolução de CQO (Alcochete)

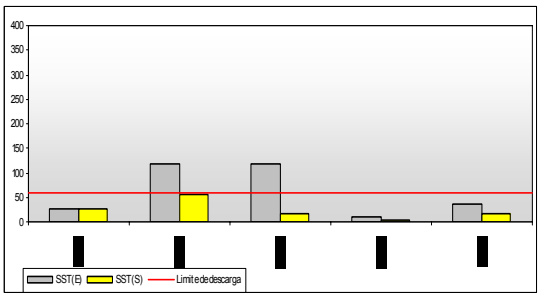

Figura 5.10 – Evolução de SST (Alcochete)

O Quadro 5.5 mostra os valores das análises efectuadas a outros parâmetros físico-químicos do sistema de Alcochete obtidos entre Outubro de 2002 e Outubro de 2006.

Quadro 5.5 – Parâmetros físico-químicos do sistema de Alcochete

DATAS	pH (E) (Escala Sorensen)	pH (S) (Escala Sorensen)	P (E) (mg/L P)	P (S) (mg/L P)	P Ef. (%)	N (E) (mg/L N)	N (S) (mg/L N)	N Ef.(%)
Out-02	7,1	6,7	3	2	33	28	14	50
Mar-03	6,8	7,3	2	2	0	115	**104**	10
Nov-03	7,5	7,3	1	1	25	50	6	88
Mar-05	7,8	7,3	6	5	21	78	**26**	67
Out-06	7,7	7,5	5	2	54	33	**21**	36
Média	7,4	7,2	3	2	27	61	34	50
DesvPad	0,4	0,3	2	2	20	36	40	30

Os valores do pH não apresentam grandes variações, situando-se numa gama próxima da neutralidade: entre 6,7 e 7,8. O fósforo está sempre abaixo do valor limite de descarga, com uma eficiência média de 27%. O azoto, na maioria das vezes, apresenta valores superiores ao limite de descarga, como se pode verificar nos gráficos das Figuras 5.11 e 5.12. com uma percentagem média de remoção de 50%.

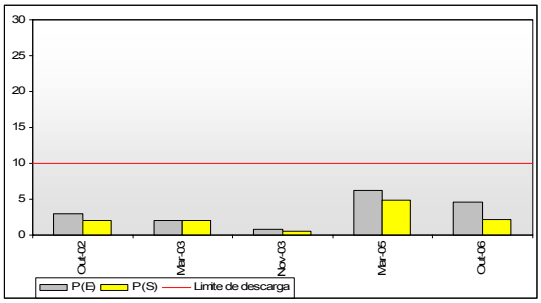

Figura 5.11 – Evolução do Fósforo total (Alcochete)

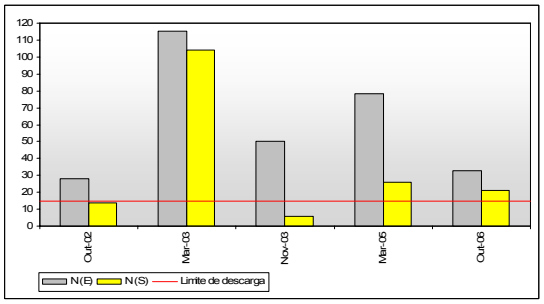

Figura 5.12 – Evolução do Azoto total (Alcochete)

5.2.3 – Sistema de Aranhas – Castelo Branco

Trata-se de um dos sistemas mais recentes a ser estudado neste trabalho, estando em funcionamento desde 2004. Foi projectado pela empresa Proengel e construído pela Edioc. Serve uma população de 437 habitantes, ocupa uma área de 4100 m^2, só possui um leito de macrófitas com *Phragmites* e uma fossa séptica como órgão de pré-tratamento. Recebe efluentes de águas residuais domésticas e águas pluviais, que são analisados mensalmente. São efectuados alguns trabalhos de manutenção ao nível da grelha de entrada, desobstrução das tubagens do leito e corte das plantas.

No Quadro 5.6 podem analisar-se os valores dos parâmetros referentes a este sistema que foram recolhidos entre Junho de 2004 e Outubro de 2005, num total de 17 amostras.

Quadro 5.6 – Parâmetros físico-químicos globais do sistema de Aranhas

DATAS	CBO_5 (E) (mg/L O_2)	CBO_5(S) (mg/L O_2)	CBO_5 Ef. (%)	CQO (E) (mg/L O_2)	CQO (S) (mg/L O_2)	CQO Ef. (%)	SST (E) (mg/L)	SST (S) (mg/L)	SST Ef. (%)
Jun-04	120	40	67	405	142	65	62	16	74
Set-04	200	**55**	73	513	**340**	34	67	51	24
Set-04	240	**50**	79	755	129	83	89	38	57
Out-04	25	20	20	185	96	48	164	16	90
Out-04	160	5	97	340	23	93	42	18	57
Nov-04	180	**45**	75	493	137	72	62	26	58
Dez-04	180	20	89	433	122	72	52	27	48
Jan-05	260	**120**	54	838	**296**	65	280	18	94
Fev-05	350	**60**	83	606	**181**	70	336	50	85
Abr-05	320	**120**	63	729	**177**	76	320	44	86
Mai-05	550	**45**	92	1027	**312**	70	148	15	90
Jun-05	140	**90**	36	391	**208**	47	66	48	27
Jul-05	600	**90**	85	1900	133	93	640	38	94
Ago-05	520	20	96	771	85	89	115	22	81
Set-05	320	**45**	86	1015	**173**	83	1697	13	99
Out-05	120	19	84	307	47	85	318	12	96
Nov-05	90	5	94	276	24	91	113	8	93
Jan-06	35	20	43	135	105	22	124	15	88
Fev-06	25	10	60	149	33	78	20	2	90
Mar-06	520	5	99	673	10	99	380	14	96
Abr-06	440	8	98	581	36	94	430	5	99
Mai-06	160	28	83	381	82	78	182	20	89
Jun-06	128	21	84	171	59	65	96	17	82
Jul-06	450	30	93	672	52	92	198	18	91
Ago-06	200	36	82	545	93	83	1940	29	99
Set-06	21	12	43	56	25	55	14	9	36
Out-06	170	9	95	276	31	89	290	31	89
Nov-06	90	5	94	269	10	96	4036	2	100
Dez-06	120	5	96	154	10	94	229	2	99
Abr-07	2200	15	99	3247	33	99	4590	4	100
Média	298	35	78	610	107	76	570	21	80
DesvPad	396	33	21	619	91	19	1110	15	22

O desempenho do sistema de Aranhas em relação a CBO e a CQO revela alguns incumprimentos para os valores limite de descarga, embora na generalidade as percentagens de eficiência sejam elevadas. Já no que diz respeito aos SST a remoção é muito boa conseguindo respeitar o valor máximo permitido que é 60 mg/l. Nas Figuras 5.13, 5.14 e 5.15 estão representados graficamente os valores monitorizados deste sistema.

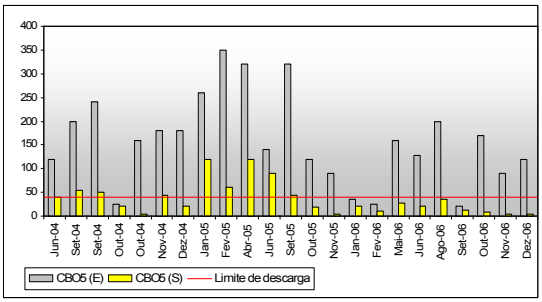

Figura 5.13 – Evolução de CBO_5 (Aranhas)

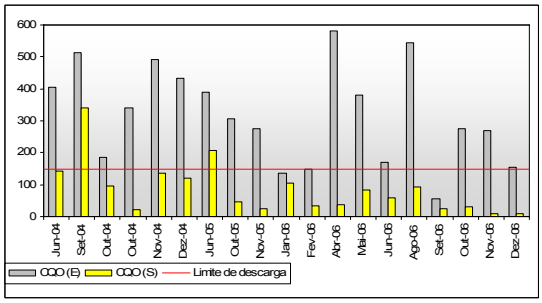

Figura 5.14 – Evolução de CQO (Aranhas)

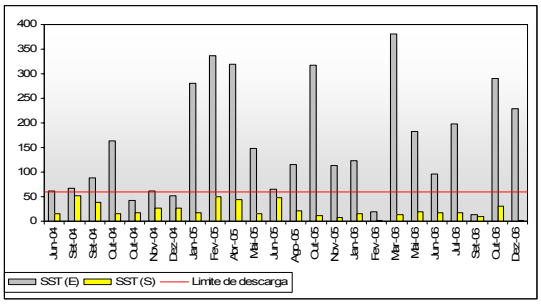

Figura 5.15 – Evolução de SST (Aranhas)

A análise do pH, fósforo e azoto, é feita no Quadro 5.7 e nos gráficos das figuras 5.16 e 5.17, podendo concluir-se que apesar dos valores do fósforo cumprirem o valor limite de descarga, a eficiência de remoção não é muito elevada porque os valores de fósforo à entrada do sistema são relativamente baixos. O azoto, na maior parte das vezes, apresenta valores superiores ao permitido (15 mg/L N), embora a eficiência registada seja boa.

Quadro 5.7 – Parâmetros físico-químicos do sistema de Aranhas

DATAS	pH (E) (Escala Sorensen)	pH (S) (Escala Sorensen)	P (E) (mg/L P)	P (S) (mg/L P)	P Ef. (%)	N (E) (mg/L N)	N (S) (mg/L N)	N Ef.(%)
Jun-04	6,6	6,6	5	5	0	169	**68**	60
Set-04	7	6,9	5	5	0	57	12	79
Set-04	6,7	6,8	5	4	20	85	6	93
Out-04	7,1	6,3	5	5	0	23	7	70
Nov-04	6,9	7,2	5	5	0	113	**52**	54
Dez-04	6,9	7,1	5	5	0	43	**29**	33
Jan-05	7,4	7,3	16	5	69	96	**69**	28
Fev-05	6,2	6,6	7	5	29	99	12	88
Abr-05	6,4	6,4	10	5	50	170	**23**	86
Mai-05	6,9	6,7	11	5	55	101	**79**	22
Jun-05	6,7	6,8	5	4	20	57	**47**	18
Jul-05	6,6	6,8	13	5	62	234	**37**	84
Ago-05	6,7	6,8	6	3	50	48	**17**	65
Set-05	6,6	6,7	9	4	56	112	**84**	25
Out-05	6,9	6,6	6	3	50	68	**45**	34
Nov-05	7,2	6,8	6	2	67	36	4	89
Jan-06	7,2	6,9	3	2	33	44	**17**	61
Fev-06	6,7	6,8	3	2	33	24	9	63
Mar-06	6,4	6,7	2	1	50	189	3	98
Abr-06	6,4	6,8	2	1	50	40	**17**	58
Mai-06	6,7	6,7	8	2	75	61	**34**	44
Jun-06	6,9	6,9	2	2	0	48	**39**	19
Jul-06	6,8	6,9	7	3	57	82	**17**	79
Ago-06	6,8	7,1	7	6	14	76	**55**	28
Set-06	7	6,9	6	3	50	51	**34**	33
Out-06	6,8	7,1	4	2	50	44	**42**	5
Nov-06	6,3	6,8	10	2	80	57	3	95
Dez-06	6,6	7,2	2	1	50	24	12	50
Média	7	7	6	3	38	80	31	56
DesvPad	0	0	3	2	26	53	24	28

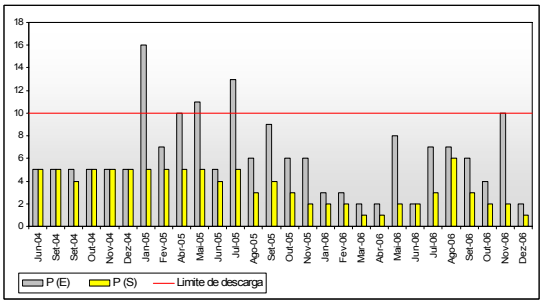

Figura 5.16 – Evolução do Fósforo total (Aranhas)

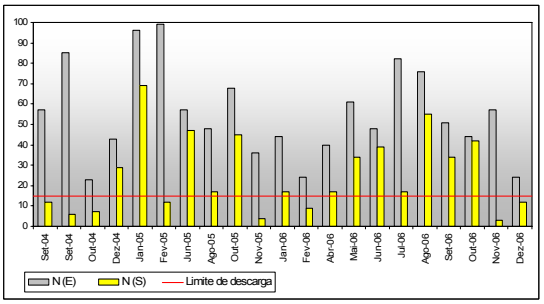

Figura 5.17 – Evolução do Azoto total (Aranhas)

5.2.4 – Sistema de Condeixa (ETAR de Anobra)

O sistema de Condeixa foi projectado pelo GAT de Coimbra, construído por Cipriano Pereira de Carvalho e Filhos - Lda, entrou em funcionamento em 2002, possui 1 leito de macrófitas com lírios (*Íris*) e *Typhas*, que florescem em alturas diferentes, mantendo sempre um aspecto verdejante durante todo o ano. Serve uma população de 600 habitantes, ocupando todo o sistema uma área de 4600 m^2, e o leito aproximadamente 1600 m^2. Possui um tanque Imhoff como pré-tratamento, só recebe efluentes domésticos e as obras de manutenção consistem na limpeza da grelha de entrada e no corte das plantas, embora ocasionalmente ocorram problemas de colmatação. A Figura 5.18 mostra o leito de macrófitas deste sistema, perfeitamente integrado na paisagem local.

Figura 5.18 – Leito de macrófitas do sistema de Condeixa (2003)

Os valores dos parâmetros que foram analisados reportam-se a um período de 5 anos que vai desde Janeiro de 2003 até Março de 2007, num total de 17 amostras, Quadro 5.8.

Este sistema apresenta eficiências elevadas, apesar de por vezes ultrapassar os valores limite de descarga no que respeita ao parâmetro CBO. Em relação a CQO e SST, tem um bom desempenho, boas eficiências e poucos incumprimentos, como se verifica da análise dos gráficos das Figuras 5.19, 5.20 e 5.21.

Quadro 5.8 – Parâmetros físico-químicos globais do sistema de Condeixa

Datas	CBO_5 (E) (mg/L O_2)	CBO_5(S) (mg/L O_2)	CBO_5 Ef. (%)	CQO (E) (mg/L O_2)	CQO (S) (mg/L O_2)	CQO Ef. (%)	SST (E) (mg/L)	SST (S) (mg/L)	SST Ef. (%)
Jan-03	20	1	95	66	15	77	77	5	94
Fev-03	14	13	7	37	29	22	14	1	93
Mar-03	250	14	94	390	52	87	86	1	99
Mai-03	22	16	27	48	40	17	26	15	42
Jun-03	45	15	67	81	92	-14	36	25	31
Out-03	80	22	73	141	107	24	55	55	0
Fev-04	49	18	63	160	86	46	50	6	88
Abr-04	130	18	86	280	58	79	210	6	97
Jun-04	90	12	87	380	78	79	124	4	96
Jul-04	380	36	91	1400	94	93	1900	10	99
Nov-04	49	22	55	114	84	26	53	20	62
Fev-05	195	**48**	75	490	**153**	69	132	17	87
Jun-05	300	32	89	1500	**167**	89	1500	**89**	94
Set-05	212	13	94	460	77	83	190	**72**	62
Jul-06	295	**57**	81	365	105	71	192	24	88
Nov-06	205	9	96	456	34	93	243	10	96
Mar-07	250	30	88	261	61	77	198	5	97
Média	152	22	75	390	78	60	299	21	78
DesvPad	117	14	25	428	41	33	537	26	29

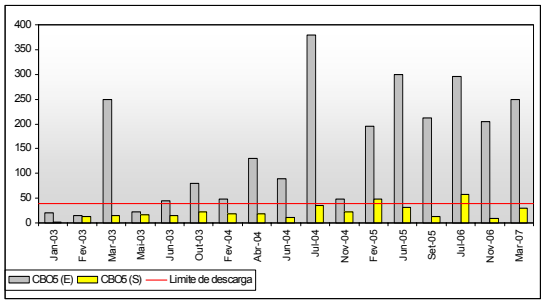

Figura 5.19 – Evolução de CBO_5 (Condeixa)

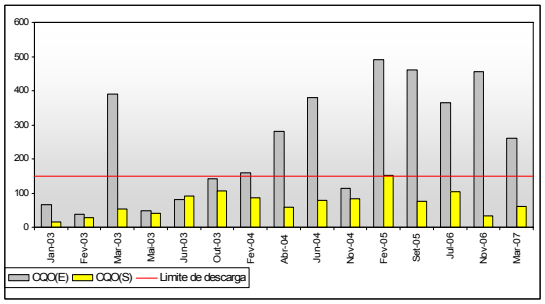

Figura 5.20 – Evolução de CQO (Condeixa)

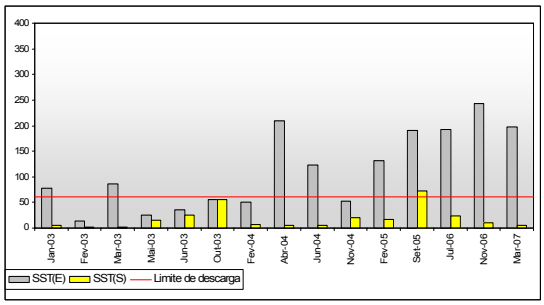

Figura 5.21 – Evolução de SST (Condeixa)

No Quadro 5.9 e nas Figuras 5.22 e 5.23 encontram-se representados os valores de outros parâmetros físico-químicos analisados neste sistema, evidenciando-se o cumprimento do parâmetro fósforo em relação ao valor limite de descarga e os elevados valores de azoto descarregados, apesar de apresentar algumas eficiências bastante razoáveis.

Quadro 5.9 – Parâmetros físico-químicos do sistema de Condeixa

DATAS	pH (E) (Escala Sorensen)	pH (S) (Escala Sorensen)	P (E) (mg/L P)	P (S) (mg/L P)	P Ef. (%)	N (E) (mg/L N)	N (S) (mg/L N)	N Ef.(%)
Jan-03	8,1	7,8	4	1	68			
Mar-03	7	7,3	13	9	32	0	0	35
Mai-03	7,3	7	19	5	74	55	1	98
Jun-03	7,8	7	14	**13**	7	309	**148**	52
Out-03	7,9	7,7	4	3	23	67	**28**	58
Fev-04	8,1	8,3	8	4	47	35	**26**	26
Abr-04	8,1	7,8	6	5	24	52	**29**	44
Jun-04	8,2	8	8	6	30	78	**48**	38
Jul-04	7,8	8,4	22	7	68	256	**56**	78
Nov-04	8,2	8,1	4	3	18	18	**17**	6
Fev-05	9	8,6	11	10	9	88	**84**	5
Jun-05	7,5	7,9	19	9	51	495	**77**	84
Média	8	8	11	6	38	132	47	48
DesvPad	1	1	6	3	23	155	43	31

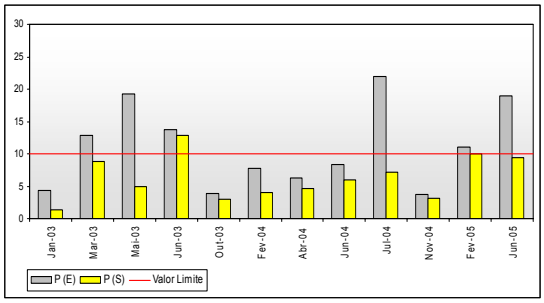

Figura 5.22 – Evolução do Fósforo total (Condeixa)

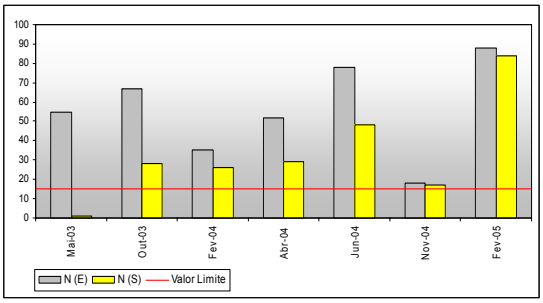

Figura 5.23 – Evolução do Azoto total (Condeixa)

5.2.5 – Sistema da Guarda (ETAR de Gonçalo)

Este sistema encontra-se em funcionamento desde 1999, foi projectado e construído pela Câmara Municipal da Guarda, serve uma população de 2000 habitantes, é constituído por 2 leitos rectangulares com 1600 e 900 m^2. O órgão do pré-tratamento é uma fossa séptica, recebe efluentes domésticos e pluviais, sendo efectuadas análises mensais ao efluente tratado, que é também reutilizado na limpeza das grelhas. São efectuados trabalhos de manutenção que incluem a limpeza das grelhas de entrada, desobstrução das tubagens do leito e corte das plantas, que actualmente são as *Phragmites*.

No Quadro 5.10 estão registados os valores dos parâmetros físico-químicos analisados entre Novembro de 2002 e Julho de 2007.

Quadro 5.10 – Parâmetros físico-químicos globais do sistema da Guarda

DATAS	CBO_5 (E) (mg/L O_2)	CBO_5(S) (mg/L O_2)	CBO_5 Ef. (%)	CQO (E) (mg/L O_2)	CQO (S) (mg/L O_2)	CQO Ef. (%)	SST (E) (mg/L)	SST (S) (mg/L)	SST Ef. (%)
Nov-02	130	23	82	230	40	83	50	14	72
Nov-02	160	**50**	69	498	**283**	43	78	8	90
Dez-02	220	**190**	14	416	**396**	5	488	35	93
Dez-02	60	18	70	200	117	42	94	58	38
Jan-03	70	22	69	152	49	68	35	28	20
Jan-03	60	10	83	119	78	34	159	59	63
Abr-03	160	24	85	327	63	81	122	12	90
Mai-03	180	**48**	73	588	111	81	96	16	83
Jun-03	280	**48**	83	565	120	79	99	51	48
Jul-03	180	**90**	50	524	**437**	17	145	58	60
Ago-03	210	40	81	555	136	75	90	38	58
Nov-03	115	5	96	267	26	90	96	12	88
Jan-04	550	5	99	1447	23	98	1805	6	100
Fev-04	520	28	95	912	46	95	220	10	95
Mar-04	320	20	94	824	72	91	106	21	80
Abr-04	320	11	97	620	67	89	62	12	81
Mai-04	190	16	92	520	73	86	184	36	80
Jun-04	160	18	89	718	57	92	88	23	74
Jul-04	380	**50**	87	1035	124	88	190	38	80
Ago-04	900	16	98	2420	97	96	380	21	94
Set-04	1000	**150**	85	1430	**442**	69	100	54	46
Out-04	200	22	89	530	90	83	64	28	56
Nov-04	420	**150**	64	801	**337**	58	88	42	52
Dez-04	280	**80**	71	625	**313**	50	60	44	27
Jan-05	420	**100**	76	1007	**240**	76	422	60	86
Mar-05	900	**140**	84	1668	**298**	82	380	56	85
Abr-05	320	**50**	84	1097	135	88	632	29	95
Mai-05	580	**55**	91	1109	**208**	81	440	42	90
Jun-05	260	32	88	773	114	85	146	40	73
Jul-05	260	**110**	58	379	**164**	57	54	42	22
Ago-05	280	**90**	68	614	**162**	74	98	32	67
Set-05	900	6	99	1707	49	97	1014	4	100
Jan-06	200	28	86	543	66	88	210	36	83
Fev-06	360	26	93	630	97	85	66	10	85
Mar-06	220	**60**	73	527	**244**	54	112	**62**	45
Abr-06	180	24	87	243	43	82	72	12	83
Mai-06	500	22	96	980	70	93	214	10	95
Jun-06	416	22	95	1096	80	93	548	12	98
Jul-06	250	40	84	758	99	87	324	8	98
Ago-06	600	**42**	93	1060	60	94	632	7	99
Set-06	680	**44**	94	985	98	90	386	8	98
Out-06	360	24	93	590	74	87	444	20	95
Nov-06	39	10	74	220	45	80	98	8	92
Dez-06	150	5	97	200	10	95	99	5	95
Jan-07	170	**44**	74	218	87	60	75	6	92
Fev-07	130	5	96	272	109	60	75	11	85
Mar-07	1300	10	99	2350	33	99	2240	4	100
Abr-07	120	24	80	320	86	73	100	16	84
Mai-07	500	25	95	660	123	81	332	19	94
Jun-07	2000	12	99	6502	51	99	4390	10	100
Jul-07	1400	**55**	96	2042	**226**	89	2330	**70**	97

Média	403	44	84	880	131	77	408	27	79
DesvPad	381	42	15	967	108	21	755	19	22

Embora as percentagens de remoção dos parâmetros físico-químicos analisados sejam normalmente elevadas, cerca de metade das vezes não se conseguem cumprir os valores limite de descarga para CBO e CQO, uma vez que os valores desses parâmetros à entrada são bastante elevados. Pelo contrário, em relação aos SST, só duas vezes é ultrapassado o valor de 60 mg/l, sendo as eficiências de remoção também elevadas. Apesar do inquérito referir alterações no funcionamento com a variação do clima, nas análises apresentadas não se verificam diferenças de remoção nos meses de Verão e nos meses de Inverno. As representações gráficas dos valores de CBO, CQO e SST estão apresentadas nas Figuras 5.24, 5.25 e 5.26.

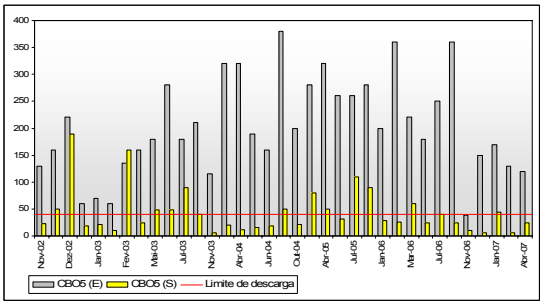

Figura 5.24 – Evolução de CBO_5 (Guarda)

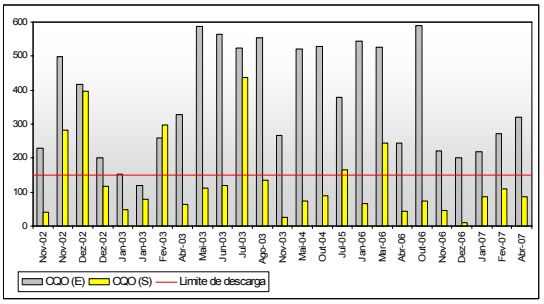

Figura 5.25 – Evolução de CQO (Guarda)

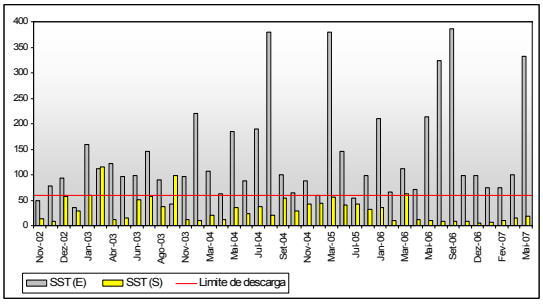

Figura 5.26 – Evolução de SST (Guarda)

Os registos dos parâmetros físico-químicos, pH, fósforo e azoto, deste sistema estão representados no Quadro 5.11 e nos gráficos das Figuras 5.27 e 5.28.

Verifica-se que a remoção de fósforo não atinge percentagens muito elevadas, mas cumpre o valor limite de descarga. No caso do azoto, apesar da taxa de remoção ser um pouco mais elevada, a maior parte das vezes os resultados são superiores aos valores permitidos por lei. Os valores pH são normais, situando-se no intervalo de 5,9 a 8,4.

Quadro 5.11 – Parâmetros físico-químicos do sistema da Guarda

DATAS	pH (E) (Escala Sorensen)	pH (S) (Escala Sorensen)	P (E) (mg/L P)	P (S) (mg/L P)	P Ef. (%)	N (E) (mg/L N)	N (S) (mg/L N)	N Ef.(%)
Nov-02	6,8	7,1	10	5	50	38	**29**	24
Nov-02	7,1	6,9	15	8	47	140	**60**	57
Dez-02	6,7	6,2	13	9	31	59	**25**	58
Dez-02	6,8	6,5	9	7	22	38	**23**	39
Jan-03	6,7	2,5	8	5	38	24	**17**	29
Fev-03	7,2	6,8	11	5	55	31	**26**	16
Abr-03	7,1	7,2	8	5	38	120	**85**	29
Mai-03	7	6,9	13	5	62	16	11	31
Jun-03	6,9	6,9	8	6	25	34	14	59
Jul-03	6,8	7	12	8	33	110	**110**	0
Ago-03	6,4	6,6	10	7	30	110	**73**	34
Nov-03	6,9	7,0	9	6	33	101	**17**	83
Jan-04	6,7	6,9	8	5	38	281	3	99
Fev-04	6,6	7,0	7	5	29	90	10	89
Mar-04	6,8	7,3	6	5	17	169	**31**	82
Abr-04	6,3	6,3	5	4	20	113	6	95
Mai-04	6,7	6,7	5	5	0	113	9	92
Jun-04	7,1	7,2	5	5	0	86	4	95
Jul-04	6,5	6,4	6	5	17	141	**17**	88
Ago-04	6,7	6,7	6	5	17	225	**20**	91
Set-04	6,1	7,0	5	4	20	225	**34**	85
Out-04	7,9	6,6	5	5	0	113	12	89
Nov-04	7,5	6,4	6	5	17	169	**51**	70
Dez-04	7,1	7,1	5	4	20	93	**66**	29
Jan-05	6,7	7,1	13	5	62	127	**74**	42
Mar-05	7,5	6,7	8	4	50	253	**92**	64
Abr-05	7	6,9	6	5	17	113	15	87
Jun-05	6,8	7,1	9	4	56	183	15	92
Jul-05	6,7	6,8	5	5	0	59	**41**	31
Ago-05	6,8	6,9	10	5	50	81	**24**	70
Set-05	6,7	6,8	12	5	58	169	**25**	85
Jan-06	6,8	7,0	7	4	43	83	12	86
Fev-06	7,5	7,0	7	7	0	132	**28**	79
Mar-06	8,3	7,6	9	6	33	62	**23**	63
Abr-06	8,4	7,2	3	2	33	79	**20**	75
Mai-06	6,4	7,3	4	2	50	85	**28**	67
Jun-06	6,9	7,0	9	7	22	80	**62**	23
Jul-06	7	7,2	11	9	18	113	**34**	70
Ago-06	7,3	6,9	16	3	81	90	**26**	71
Set-06	6,9	7,5	8	8	0	96	**20**	79
Out-06	7,2	7,5	6	6	0	87	**85**	2
Nov-06	6,9	7,1	3	2	33	51	**28**	45
Dez-o6	6,9	6,7	2	1	50	32	**24**	25
Média	7	7	8	5	31	107	33	61
DesvPad	0	1	3	2	20	61	26	28

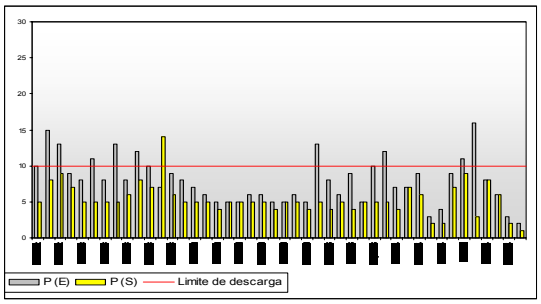

Figura 5.27 – Evolução do Fósforo total (Guarda)

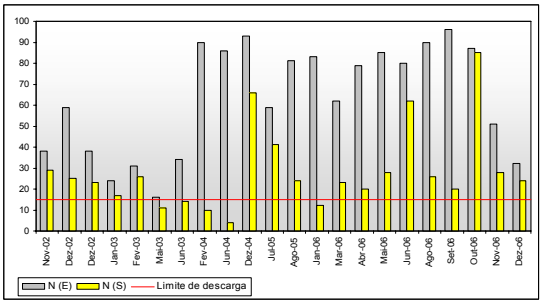

Figura 5.28 – Evolução do Azoto total (Guarda)

5.2.6 – Sistema de Penacova (ETAR de S. Pedro d' Alva)

A ETAR de S. Pedro d'Alva, referenciada como sistema de Penacova, serve 500 habitantes e foi construída por uma empresa particular, sendo o projecto da Câmara Municipal de Penacova. O custo final do sistema foi de 97 266 euros, ocupa uma área de 3240 m^2, é constituída por 2 leitos, um tanque Imhoff e encontra-se em funcionamento desde finais de 2001. Recebe na sua maioria efluentes domésticos, mas também águas pluviais, provenientes de ligações clandestinas. São efectuadas trimestralmente análises do efluente, que revelam que na maioria das vezes os efluentes cumprem as normas de descarga. As plantas utilizadas são as *Phragmites*, que depois de cortadas são utilizadas na adubação de matas. Não se verificam grandes problemas de funcionamento (à excepção de colmatações do leito pouco frequentes), apresentando o sistema um nível elevado de eficiência, razão pela qual já foi construída mais uma ETAR de macrófitas no concelho.

Os resultados da monitorização efectuada no sistema de Penacova no período compreendido entre Janeiro de 2002 e Abril de 2007, relativamente aos parâmetros físico-químicos encontram-se registados no Quadro 5.12 e nos gráficos das Figuras 5.29, 5.30 e 5.31, respectivamente a CBO_5, CQO e SST.

Quadro 5.12 – Parâmetros físico-químicos globais do sistema de Penacova

DATAS	CBO_5 (E) (mg/L O_2)	CBO_5(S) (mg/L O_2)	CBO_5 Ef. (%)	CQO (E) (mg/L O_2)	CQO (S) (mg/L O_2)	CQO Ef. (%)	SST (E) (mg/L)	SST (S) (mg/L)	SST Ef. (%)
Mai-02	840	**50**	94	1180	100	92	210	30	86
Ago-02	340	**45**	87	580	140	76	160	40	75
Nov-02	150	30	80	220	80	64	70	30	57
Mai-03	340	**45**	87	590	100	83	90	10	89
Ago-03	1600	**55**	97	3090	**320**	90	220	10	95
Nov-03	420	**44**	90	670	100	85	80	10	88
Mar-04	360	32	91	570	100	82	80	10	88
Jun-04	250	35	86	490	100	80	60	10	83
Set-04	480	**70**	85	720	100	86	130	50	62
Dez-04	500	30	94	920	80	91	300	30	90
Mar-05	540	40	93	890	100	89	390	20	95
Jun-05	700	35	95	800	130	84	140	20	86
Set-05	1800	**65**	96	3000	**160**	95	2300	40	98
Dez-05	200	38	81	450	67	85	140	10	93
Mar-06	155	26	83	330	**170**	48	50	20	60
Set-06	340	**45**	87	670	110	84	200	30	85
Abr-07	400	25	94	760	130	83	310	11	96
Média	554	42	89	937	123	82	290	22	84
DesvPad	469	13	5	825	58	11	527	13	13

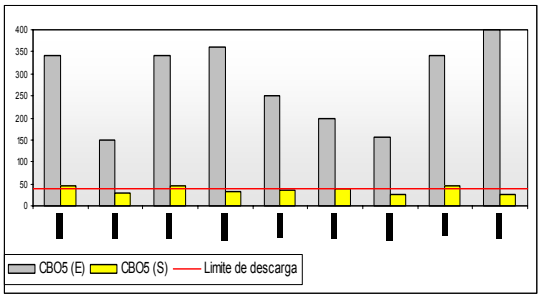

Figura 5.29 – Evolução de CBO_5 (Penacova)

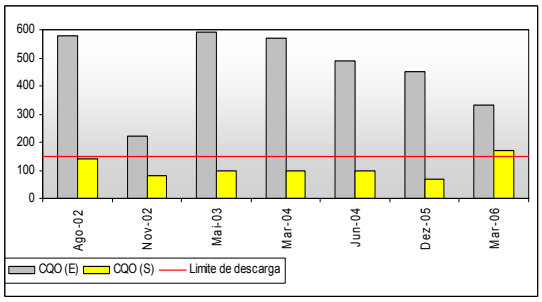

Figura 5.30 – Evolução de CQO (Penacova)

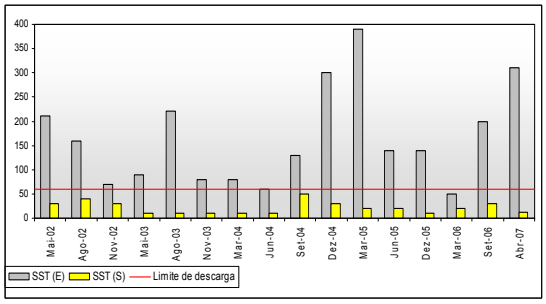

Figura 5.31 – Evolução de SST (Penacova)

Da análise das 19 amostras verifica-se que a CBO_5, cerca de metade das vezes, não cumpre os valores limites de descarga porque esses valores são muito elevados à entrada, embora não ultrapassem muito os 40 mg/L e consegue ter boas eficiências. Em relação ao CQO, os valores são quase sempre inferiores a 150 mg O_2/L, indicando boas eficiências. Os SST a partir de Maio-02 também estão sempre abaixo do limite legal, com eficiências entre os 57% e os 98%. Apesar dos incumprimentos registados, a média da eficiência da CBO_5, CQO e SST apresenta valores elevados, 89%, 82% e 84% respectivamente, indicando bons resultados para a descarga do efluente.

No Quadro 5.13 estão registados os valores de outros parâmetros físico-químicos do sistema de Penacova.

Os valores do pH mantêm-se dentro do intervalo de 6 a 9, o fósforo consegue obter valores à saída a rondar o limite de descarga ou inferior a este, enquanto que o azoto excede sempre o seu limite, tendo mesmo algumas situações de aumento da sua concentração à saída do leito de macrófitas (Figuras 5.32 e 5.33).

Quadro 5.13 – Parâmetros físico-químicos do sistema de Penacova

DATAS	pH (E) (Escala Sorensen)	pH (S) (Escala Sorensen)	P (E) (mg/L P)	P (S) (mg/L P)	P Ef. (%)	N (E) (mg/L N)	N (S) (mg/L N)	N Ef.(%)
Abr-02	7	6,7	13	7	48	77	**41**	47
Set-02	---	---	20	**12**	40	63	**35**	44
Nov-02	6,8	7,4	3	3	0	20	**19**	5
Mai-03	6,9	7,1	23	**11**	52	120	**94**	22
Ago-03	7,1	8	21	**11**	48	210	**78**	63
Nov-03	7,4	6,6	5	7	-31	50	**35**	30
Mar-04	6,8	7,5	12	6	54	45	**28**	38
Set-04	6,8	7,4	12	**11**	8	83	**70**	16
Dez-04	7	7,1	10	5	44	66	**40**	39
Set-05	5,8	7,9	11	8	28	100	**59**	41
Dez-05	6,9	7,5	7	3	58	53	**23**	57
Set-06	6,9	7,1	7	7	-4	60	**64**	-7
Abr-07	6,8	7,2	9	5	42	71	**35**	51
Média	6,9	7,3	12	7	30	78	48	34
DesvPad	0	0	6	3	28	47	23	20

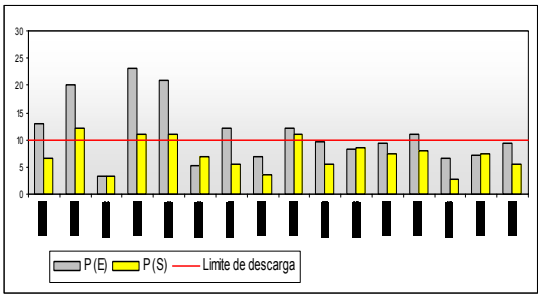

Figura 5.32 – Evolução do Fósforo total (Penacova)

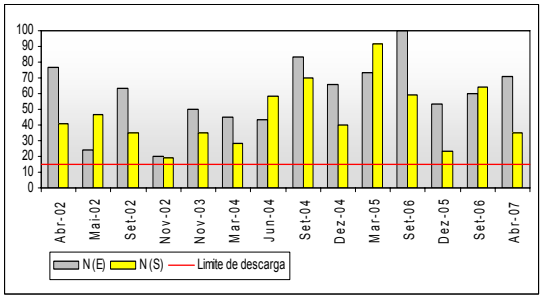

Figura 5.33 – Evolução do Azoto total (Penacova)

5.2.7 – Sistema de Rossas – Vieira do Minho

Projectado e construído em 2001 pela empresa Etarplan, o sistema de Rossas, localizado no concelho de Vieira do Minho, actualmente explorado pela empresa Águas do Ave, serve uma população de 600 habitantes, ocupando uma área de 1800 m^2, onde são utilizadas as *Phragmites*, tendo como órgão de tratamento primário uma fossa séptica. Recebe efluentes domésticos e pluviais, sendo efectuadas análises mensais, que cumprem a legislação em vigor. É efectuada bastante manutenção no sistema, ao nível da grelha de entrada, desobstrução das tubagens do leito e corte das plantas, que posteriormente são utilizadas como adubo na agricultura. Não se verificam alterações no sistema com a variação do clima.

O Quadro 5.14 mostra os valores dos parâmetros de CBO, CQO e SST à entrada e saída do sistema, bem como a percentagem de eficiência deste sistema entre 2004 e 2006.

Os valores dos parâmetros analisados indicam um alto grau de tratamento da água residual, apresentando uma média de remoção de 95% para CBO, 91% para CQO e 97% para SST. Nas

Figuras 5.34, 5.35 e 5.36 pode ver-se a representação gráfica dos valores registados à entrada do sistema e à saída do leito de macrófitas.

Quadro 5.14 – Parâmetros físico-químicos globais do sistema de Rossas

Datas	CBO_5 (E) (mg/L O_2)	CBO_5(S) (mg/L O_2)	CBO_5 Ef. (%)	CQO (E) (mg/L O_2)	CQO (S) (mg/L O_2)	CQO Ef. (%)	SST (E) (mg/L)	SST (S) (mg/L)	SST Ef. (%)
Set-04	320	10	97	1200	86	93	270	15	94
Nov-04	3100	17	99	4400	87	98	4300	7	100
Dez-04	100	10	90	310	20	94	110	5	95
Jan-05	610	16	97	900	60	93	280	7	98
Fev-05	590	15	97	1100	52	95	470	7	99
Mar-05	700	11	98	1500	56	96	850	10	99
Abr-05	560	10	98	3500	87	98	1700	11	99
Mai-05	230	10	96	570	46	92	200	6	97
Jun-05	1400	10	99	3000	32	99	3200	5	100
Jul-05	94	10	89	400	56	86	120	13	89
Ago-05	440	10	98	1300	20	98	530	16	97
Set-05	210	10	95	1100	44	96	370	14	96
Out-05	380	10	97	860	26	97	390	19	95
Nov-05	180	10	94	710	38	95	270	5	98
Dez-05	300	10	97	810	43	95	310	6	98
Jan-06	180	20	89	364	50	86	110	5	95
Fev-06	382	20	95	458	50	89	185	7	96
Mar-06	100	20	80	203	50	75	105	5	95
Abr-06	327	20	94	577	50	91	218	5	98
Mai-06	817	20	98	1120	101	91	750	5	99
Jun-06	679	20	97	1120	131	88	610	11	98
Jul-06	507	20	96	889	50	94	471	19	96
Ago-06	300	20	93	513	50	90	189	5	97
Set-06	536	20	96	781	56	93	438	20	95
Out-06	383	20	95	477	138	71	237	8	97
Nov-06	155	20	87	280	50	82	126	8	94
Dez-06	360	20	94	597	50	92	231	5	98
Média	516	15	95	1076	58	91	631	9	97
DesvPad	586	5	4	1000	29	7	968	5	2

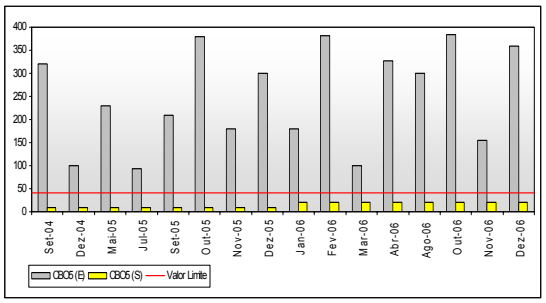

Figura 5.34 – Evolução de CBO_5 (Rossas)

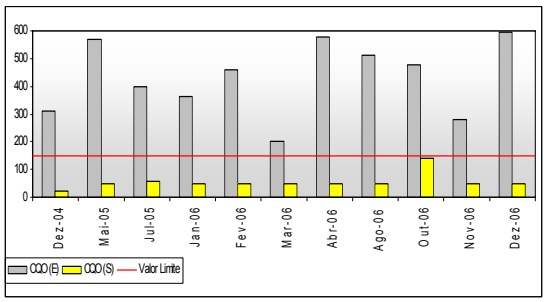

Figura 5.35 – Evolução de CQO (Rossas)

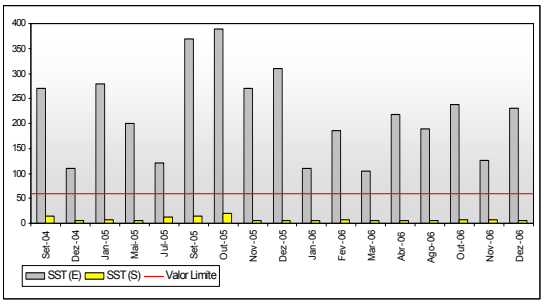

Figura 5.36 – Evolução de SST (Rossas)

No Quadro 5.15 e nos gráficos das Figuras 5.37 e 5.38 encontram-se outros parâmetros físico-químicos analisados neste sistema, evidenciando-se um bom desempenho no que diz respeito à eliminação do fósforo com eficiências elevadíssimas. O azoto apesar de também ter boas percentagens de remoção, muitas vezes não consegue cumprir o valor limite de descarga. Relativamente ao pH, mantém-se no intervalo de valores entre 6,0 e 9,2.

Quadro 5.15 – Parâmetros físico-químicos do sistema de Rossas

DATAS	pH (E) (Escala Sorensen)	pH (S) (Escala Sorensen)	P (E) (mg/L P)	P (S) (mg/L P)	P Ef. (%)	N (E) (mg/L N)	N (S) (mg/L N)	N Ef.(%)
Out-04			14	0	98	115	**24**	79
Nov-04	6,8	6,4	30	3	89	263	**21**	92
Fev-05	9,2	7,2	15	0	98	125	6	95
Mar-05	8,4	7,1	15	0	98	166	**43**	74
Mai-05	8,6	7	20	2	89	126	**16**	87
Jun-05	7,1	7	39	0	99	210	**42**	80
Jul-05	7,9	7,1	40	0	99	96	**53**	45
Ago-05	8,4	5,2	22	0	99	188	**80**	57
Set-05	7,7	5,6	24	0	99	156	**80**	49
Nov-05	8,4	6,9	19	1	96	119	**28**	76
Dez-05	8,1	7,2	27	0	99	81	14	83
Jan-06	7,9	6,6	7	1	89	40	**22**	44
Fev-06	7,7	7,0	21	1	98	84	**17**	80
Mar-06	7,3	6,6	4	0	93	25	11	57
Abr-06	8,5	6,8	11	0	97	118	15	88
Mai-06	7,1	7,3	13	0	98	64	13	80
Jun-06	8,3	6,6	18	0	98	169	**33**	80
Jul-06	7,1	6,6	12	1	95	91	**42**	54
Ago-06	8	7,5	17	0	98	129	**25**	81
Set-06	7,3	6,0	12	1	89	131	**41**	68
Out-06	8,2	7,3	7	1	92	136	**67**	51
Nov-06	7,5	6,6	5	1	90	61	14	78
Dez-06	7,7	6,5	7	1	86	72	14	80
Média	8	7	17	1	95	120	31	72
DesvPad	1	1	10	1	4	56	22	16

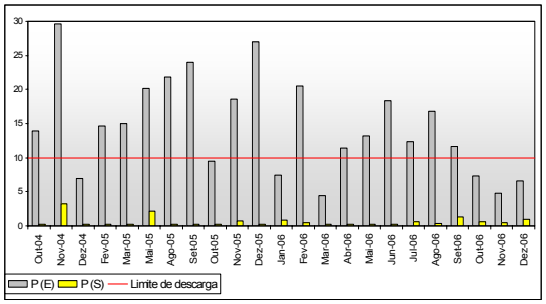

Figura 5.37 – Evolução do Fósforo total (Rossas)

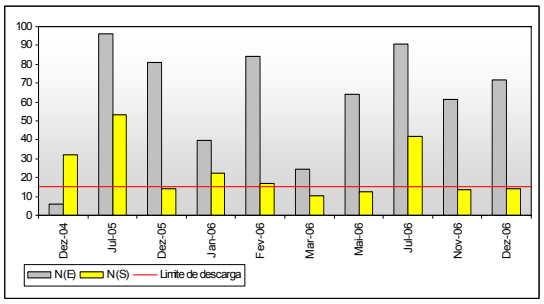

Figura 5.38 – Evolução do Azoto total (Rossas)

5.2.8 – Sistema de Salamonde 2 – Vieira do Minho

Este sistema pertence ao concelho de Vieira do Minho, e foi construído em 2001, serve uma população de 250 habitantes, ocupando uma área de 600 m^2, sendo utilizadas *Phragmites*. O pré-tratamento é realizado através de uma fossa séptica, que recebe efluentes domésticos e pluviais, resultantes de ligações clandestinas. São efectuados regularmente alguns trabalhos de manutenção, como a limpeza da grelha de entrada, desobstrução das tubagens do leito e corte das plantas, que não se mantendo verdejantes durante todo o ano, são cortadas e aplicadas na agricultura. Não se têm verificado problemas no sistema, nem se registaram alterações no funcionamento ao longo do ano, pelo que os responsáveis entendem tratar-se de um bom sistema a utilizar, pretendendo mesmo continuar a implementar mais no concelho de Vieira do Minho.

A Figura 5.39 mostra os dois leitos de macrófitas no Outono, altura do ano em que as plantas parecem secas.

Figura 5.39 – Sistema de Salamonde 2 (2002)

No Quadro 5.16 e nos gráficos das Figuras 5.40, 5.41 e 5.42 apresentam-se os valores dos parâmetros físico-químicos das amostras das águas residuais do sistema de Salamonde 2, num total de 27 campanhas de recolha.

Da análise dos resultados apresentados conclui-se que o grau de eficiência é bastante elevado para qualquer dos parâmetros sendo em média 82% para o CBO_5, 76% para CQO e 91% para SST, sendo os valores de descarga sempre inferiores ao limite imposto pela legislação.

Há um grande controlo da qualidade do efluente, mensal, quer à entrada, quer à saída, o que torna possível determinar a eficiência do leito de macrófitas, verificando-se que esta tem vindo a aumentar no decorrer do tempo, cumprindo os valores limites de descarga, sobretudo no que diz respeito aos parâmetros físico-químicos globais (CBO_5, CQO e SST).

Quadro 5.16 – Parâmetros físico-químicos globais do sistema de Salamonde 2

DATAS	CBO_5 (E) (mg/L O_2)	CBO_5(S) (mg/L O_2)	CBO_5 Ef. (%)	CQO (E) (mg/L O_2)	CQO (S) (mg/L O_2)	CQO Ef. (%)	SST (E) (mg/L)	SST (S) (mg/L)	SST Ef. (%)
Set-04	95	12	87	370	100	73	160	32	80
Out-04	360	13	96	410	110	73	100	21	79
Dez-04	320	20	94	870	22	97	460	21	95
Jan-05	240	14	94	590	140	76	280	36	87
Fev-05	250	23	91	710	120	83	310	21	93
Mar-05	240	15	94	600	130	78	270	21	92
Abr-05	600	12	98	840	51	94	330	18	95
Mai-05	10	10	0	30	50	-67	220	15	93
Jun-05	440	**64**	85	780	**170**	78	450	**130**	71
Jul-05	200	**180**	10	500	**260**	48	180	26	86
Ago-05	630	10	98	150	40	73	810	16	98
Set-05	18	10	44	780	68	91	280	26	91
Out-05	170	14	92	160	61	62	250	13	95
Nov-05	77	10	87	200	46	77	130	12	91
Dez-05	57	10	82	150	29	81	88	7	92
Jan-06	81	20	75	189	50	74	91	13	86
Fev-06	265	24	91	448	59	87	222	19	91
Mar-06	97	20	79	221	66	70	96	6	94
Abr-06	352	20	94	459	56	88	343	10	97
Mai-06	521	20	96	644	50	92	480	18	96
Jun-06	598	20	97	772	50	94	125	5	96
Jul-06	569	20	96	763	50	93	380	12	97
Ago-06	380	20	95	569	54	91	259	12	95
Set-06	266	20	92	637	119	81	250	15	94
Out-06	133	20	85	333	58	83	135	5	96
Nov-06	221	20	91	493	50	90	175	5	97
Dez-06	20	5	75	133	15	89	60	5	92
Média	267	24	82	474	77	76	257	20	91
DesvPad	193	33	25	254	53	31	162	23	6

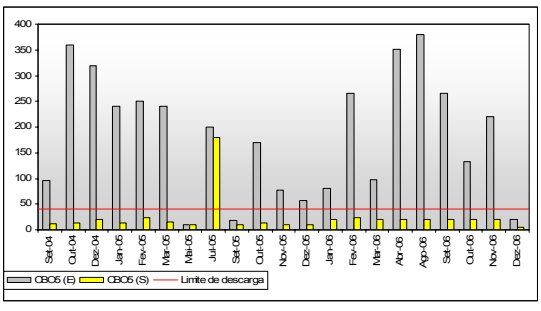

Figura 5.40 – Evolução de CBO_5 (Salamonde 2)

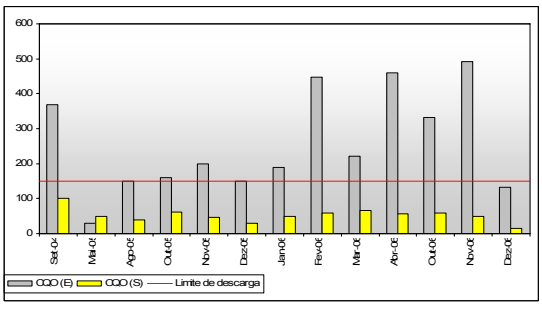

Figura 5.41 – Evolução de CQO (Salamonde 2)

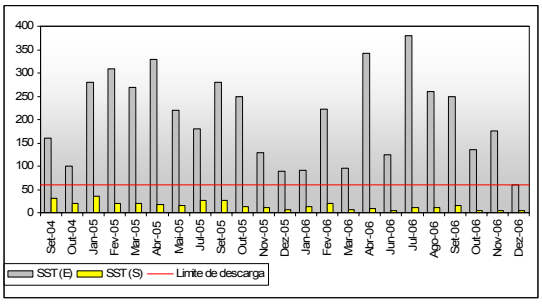

Figura 5.42 – Evolução de SST (Salamonde 2)

O Quadro 5.17 e as Figuras 5.43 e 5.44 apresentam os valores do pH, fósforo e azoto monitorizados no sistema de Salamonde 2 entre Outubro de 2004 e Dezembro de 2006.

Quadro 5.17 – Parâmetros físico-químicos do sistema de Salamonde 2

DATAS	pH (E) (Escala Sorensen)	pH (S) (Escala Sorensen)	P (E) (mg/L P)	P (S) (mg/L P)	P Ef. (%)	N (E) (mg/L N)	N (S) (mg/L N)	N Ef.(%)
Nov-04	7,6	7,2	12	4	70	31	14	55
Dez-04	7,8	7,1	13	4	69	91	**56**	38
Fev-05	8,9	7,3	13	5	63	90	**38**	58
Mar-05	8,5	7,2	15	3	81	67	9	87
Abr-05	8,9	7,2	25	6	77	148	**44**	70
Jun-05	8,5	7	8	5	37	142	**51**	64
Jul-05	8,8	7,2	17	3	82	200	**49**	76
Ago-05	8,5	7	20	6	69	215	**25**	88
Set-05	7,7	7	17	5	71	142	**60**	58
Out-05	7,4	7	5	4	27	44	**25**	43
Nov-05	8,7	7,4	8	5	37	73	**29**	60
Dez-05	8,1	7,1	4	2	39	27	11	59
Jan-06	7,1	7,0	3	3	10	25	15	41
Fev-06	7,3	7,0	6	3	47	39	**24**	39
Mar-06	7,2	7,0	4	3	25	2	2	9
Abr-06	8,4	6,7	10	2	85	93	15	84
Mai-06	8,4	7,0	17	1	95	160	**22**	86
Jun-06	7	7,0	12	1	90	120	**19**	84
Jul-06	7,2	7,9	11	1	94	95	**24**	75
Ago-06	7,3	6,6	11	0	97	111	**118**	-6
Set-06	8,5	6,8	17	2	90	177	**84**	53
Out-06	8,4	7,0	12	3	71	130	**28**	79
Nov-06	7,3	7,0	6	2	75	58	14	76
Dez-06	7,7	6,9	4	1	74	37	6	84
Média	8	7	11	3	66	97	33	61
DesvPad	1	0	6	2	25	59	27	24

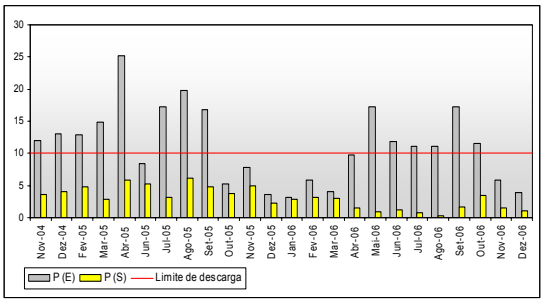

Figura 5.43 – Evolução do Fósforo total (Salamonde 2)

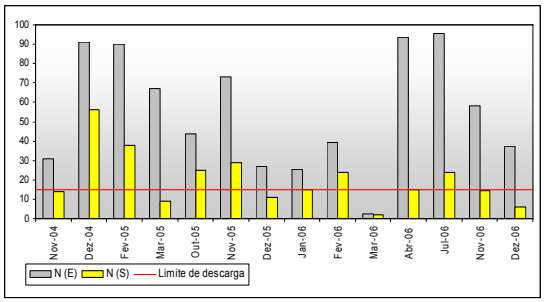

Figura 5.44 – Evolução do Azoto total (Salamonde 2)

Em relação ao fósforo verificam-se boas eficiências e o cumprimento do limite legal de descarga estabelecido (10 mg/L P). O azoto na maioria das vezes excede os 15 mg/L permitidos, mas apresenta boas eficiências de remoção, com excepção da análise de Ago-06 em que se verifica um aumento da sua concentração. Quanto aos valores de pH, verifica-se que tiveram pouca variação, entre 6,7 e 8,9.

5.2.9 – Sistema de Salvador – Penamacor

Este sistema foi projectado e construído por empresas privadas e está em funcionamento desde 2004. Tem uma fossa séptica a montante dos dois leitos de macrófitas, que se encontram plantados com *Phragmites*. A área total ocupada pelo sistema é de 3100 m^2, correspondendo 630 m^2 aos leitos e serve uma população de 563 habitantes. Para além dos efluentes domésticos recebe também águas pluviais, a monitorização é efectuada mensalmente, ocorrendo por vezes problemas de colmatação do leito devido à entrada de sólidos. Efectuam-se algumas operações de manutenção ao nível da limpeza da grelha de entrada, desobstrução das tubagens do leito e corte das plantas.

No Quadro 5.18 e nas Figuras 5.45, 5.46 e 5.47 encontram-se registados os valores obtidos na monitorização efectuada entre 2004 e 2006 no sistema de Salvador.

As remoções de CBO e CQO na maior parte das análises não conseguem cumprir os valores limite de descarga legalmente estipulados. No entanto, verifica-se que os valores destes parâmetros à entrada são anormalmente muito elevados, o que faz com que apesar de se registar uma boa eficiência se ultrapasse esses mesmos limites. Em relação aos SST a remoção é muito elevada e só uma vez foi excedido o valor limite de descarga.

Quadro 5.18 – Parâmetros físico-químicos globais do sistema de Salvador

DATAS	CBO_5 (E) (mg/L O_2)	CBO_5(S) (mg/L O_2)	CBO_5 Ef. (%)	CQO (E) (mg/L O_2)	CQO (S) (mg/L O_2)	CQO Ef. (%)	SST (E) (mg/L)	SST (S) (mg/L)	SST Ef. (%)
Jul-04	90	11	88	390	69	82	58	18	69
Set-04	320	**80**	75	825	**258**	69	106	42	60
Set-04	340	**55**	84	1019	**222**	78	102	41	60
Out-04	1250	38	97	1639	107	93	2060	22	99
Out-04	320	6	98	690	43	94	64	16	75
Nov-04	500	**100**	80	909	**276**	70	92	32	65
Dez-04	600	**60**	90	641	**257**	60	200	38	81
Fev-05	600	**120**	80	1060	**275**	74	376	44	88
Abr-05	320	**120**	63	1113	**305**	73	760	**78**	90
Mai-05	700	**45**	94	1356	**216**	84	220	23	90
Jun-05	120	**80**	33	595	**171**	71	68	32	53
Jul-05	800	**110**	86	1192	**154**	87	180	38	79
Ago-05	800	**48**	94	733	83	89	448	8	98
Out-05	420	32	92	733	83	89	448	8	98
Nov-05	160	**65**	59	362	129	64	115	20	83
Jan-06	600	40	93	898	**178**	80	328	37	89
Fev-06	1350	**85**	94	1868	**243**	87	290	32	89
Abr-06	440	**95**	78	680	**204**	70	490	53	89
Ago-06	450	38	92	667	120	82	724	15	98
Dez-06	290	5	98	408	10	98	188	14	93
Média	524	62	83	889	170	80	366	31	82
DesvPad	335	36	16	399	87	11	450	17	14

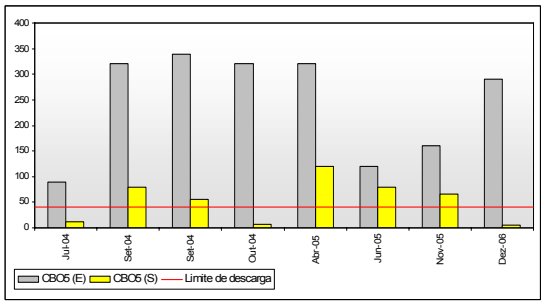

Figura 5.45 – Evolução de CBO_5 (Salvador)

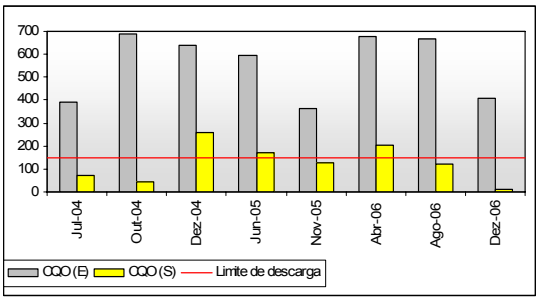

Figura 5.46 – Evolução de CQO (Salvador)

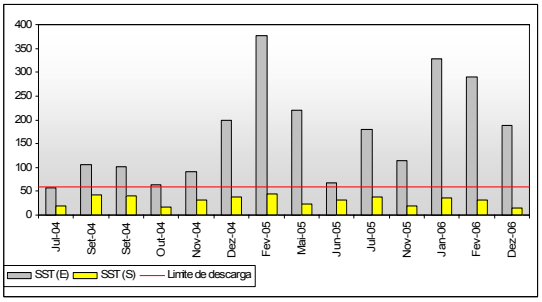

Figura 5.47 – Evolução de SST (Salvador)

No Quadro 5.19 e nos gráficos das Figuras 5.48 e 5.49 estão registados valores de outros parâmetros físico-químicos deste sistema.

Quadro 5.19 – Parâmetros físico-químicos do sistema de Salvador

DATAS	pH (E) (Escala Sorensen)	pH (S) (Escala Sorensen)	P (E) (mg/L P)	P (S) (mg/L P)	P Ef. (%)	N (E) (mg/L N)	N (S) (mg/L N)	N Ef.(%)
Jul-04	6,2	6,6	5	5	0	127	**51**	60
Set-04	6,9	6,8	5	4	20	141	15	89
Set-04	7,1	6,7	6	5	17	113	12	89
Out-04	6,6	6,7	5	4	20	99	12	88
Nov-04	7,3	6,8	5	5	0	338	**136**	60
Dez-04	7,8	6,9	7	5	29	85	**56**	34
Jan-05	7,6	6,8	7	5	29	124	**79**	36
Fev-05	4,8	5,2	8	5	38	169	**29**	83
Abr-05	7,2	6,4	13	8	38	197	**35**	82
Mai-05	6,7	6,5	12	5	58	98	**104**	-6
Jun-05	6,6	6,8	10	5	50	99	**23**	77
Jul-05	7,1	6,9	8	5	38	143	**31**	78
Ago-05	6,2	6,9	15	4	73	171	**23**	87
Out-05	6,8	6,7	14	6	57	113	**43**	62
Nov-05	6,6	6,9	9	7	22	45	**31**	31
Jan-06	7,9	7,2	7	4	43	102	**59**	42
Fev-06	5,9	6,7	8	4	50	113	**68**	40
Abr-06	6,3	6,8	6	4	33	102	**65**	36
Ago-06	6,7	7,2	6	5	17	79	11	86
Dez-06	7,1	6,7	3	2	33	56	**23**	59
Média	7	7	8	5	33	126	45	61
DesvPad	1	0	3	1	19	62	33	26

Tal como no sistema de Salamonde 2, o fósforo cumpre o valor limite de descarga com eficiências boas e o azoto na maioria das vezes excede os 15 mg/L, impostos pela legislação, apesar de ter boas eficiências de remoção. Os valores do pH não são muito uniformes, observando-se um valor mínimo de 4,8, embora se trate de uma análise pontual, e um valor máximo de 7,9.

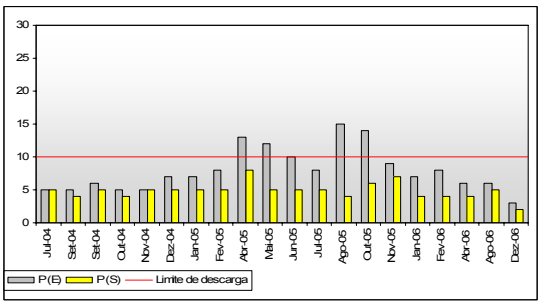

Figura 5.48 – Evolução do Fósforo total (Salvador)

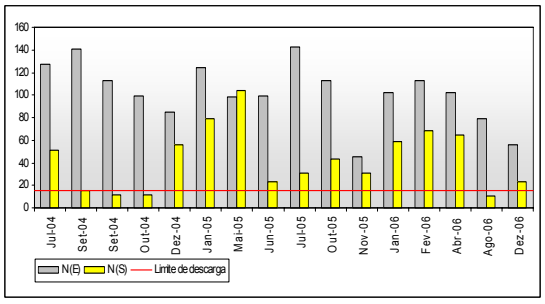

Figura 5.49 – Evolução do Azoto total (Salvador)

5.2.10 – Sistema de Vila de Rei (ETAR do Penedo)

A ETAR do Penedo está situada na zona centro interior de Portugal, numa zona rural e vai ser abordada como sistema de Vila de Rei, uma vez que pertence a este concelho, distrito de Castelo Branco. Foi projectado pela empresa CEC – Consultores de Engenharia do Centro e construído por Mendes Transportes e Construções - SA, está em funcionamento desde 2000, serve uma população de 1054 habitantes e ocupa uma área de 4325 m^2, onde são utilizadas as *Phragmites*. O tratamento

primário é efectuado por um tanque Imhoff, que só recebe águas residuais domésticas, sendo posteriormente encaminhadas para um ribeiro. Ocorrem ocasionalmente alguns problemas de colmatação do leito e odores, verificando-se algumas alterações no funcionamento em função da variação climática. Das operações de manutenção efectuadas constam a limpeza da grelha de entrada e das tubagens e o corte das plantas, que depois são utilizadas em compostagem natural. Trimestralmente efectuam-se análises do efluente tratado, no entanto, em relação ao afluente bruto não se dispõe de muitas análises.

Quadro 5.20 – Parâmetros físico-químicos do sistema de Vila de Rei

DATAS	CBO_5 (E) (mg/L O_2)	CBO_5(S) (mg/L O_2)	CBO_5 Ef. (%)	CQO (E) (mg/L O_2)	CQO (S) (mg/L O_2)	CQO Ef. (%)	SST (E) (mg/L)	SST (S) (mg/L)	SST Ef. (%)	pH (E) (Escala Sorensen)	pH (S) (Escala Sorensen)
Fev-03		**53**			124			13			
Mar-03		40			150			16			
Jul-03		**66**			146			11			
Out-03		36			105			34			
Jan-04		**105**			**250**			38			
Mai-04		28			92			17			
Jul-04		5			103			5			
Out-04		21			139			54			
Jan-05	371	34	91	935	81	91	428	22	95		
Fev-05	267	**54**	80	605	**163**	73	232	10	96		
Mar-05	115	13	89	314	**192**	39	55	15	73		
Ago-05		21			105			10			7,9
Out-05		5			77			14			7,5
Fev-06		5			**414**			20			7,5
Mai-06		38			**156**			25			7,3
Ago-06		**55**			**220**			10			7,5
Nov-06		5			93			43			7,5
Jan-07	166	**59**	64	776	**277**	64	261	**70**	73	7,4	7,4
Abr-07	155	30	81	845	**216**	74	158	48	70	7,5	7,6
Jul-07	277	38	86	673	148	78	159	16	90	7,3	7,6
Media	251	37	86	618	133	68	238	20	88	7,4	7,5
DesvPad	129	28	6	311	49	27	187	14	13	0	0

Da análise do Quadro 5.20 e dos gráficos das figuras 5.50, 5.51 e 5.52, verifica-se que os valores limite de descarga são na maior parte das vezes respeitados, apesar de muitos dados reportarem só a valores do efluente à saída. A eficiência do CBO ronda os 86%, CQO os 68% e os SST os 88%. Nos meses de Janeiro e Fevereiro de 2005, obtiveram-se valores bastante elevados à entrada, tendo em conta as características das águas residuais, o que leva a concluir que deve ter ocorrido uma descarga com concentrações muito altas de poluentes, que provavelmente não são de esgotos domésticos.

Este sistema não tem registos de análises de fósforo total e azoto total, apenas é feito o controlo do pH, que apresenta uma média de 7,5 à saída do leito de macrófitas.

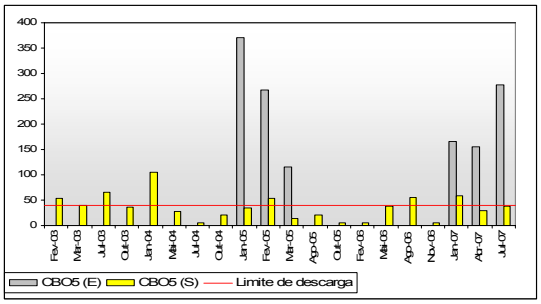

Figura 5.50 – Evolução de CBO_5 (Vila de Rei)

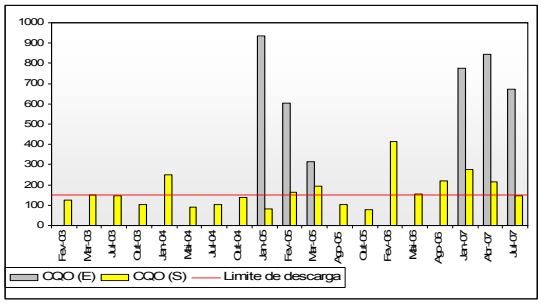

Figura 5.51 – Evolução de CQO (Vila de Rei)

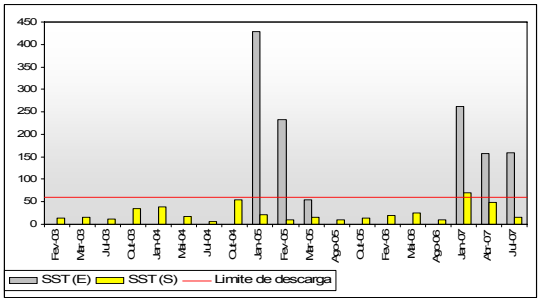

Figura 5.52 – Evolução de SST (Vila de Rei)

5.3 – Análise dos casos de estudo

Apresentados os resultados da monitorização efectuada nos 10 sistemas, a sua análise incidiu fundamentalmente nas percentagens médias de remoção e de incumprimentos face à legislação em vigor, obtidas para os seguintes parâmetros físico-químicos: CBO_5, CQO, SST, P e N, A disponibilidade destes elementos permitiu ainda, fazer a caracterização média das águas residuais brutas destes sistemas, sendo este um aspecto importante, uma vez que estes dados podem servir como princípio base de dimensionamento de projectos portugueses, dado que, na bibliografia, foram encontrados poucos elementos referentes à caracterização das águas residuais de pequenos aglomerados em Portugal.

5.3.1 – Análise das características das águas residuais brutas

As características das águas residuais brutas dos sistemas estudados, relativas aos parâmetros CBO_5, CQO, SST, P e N, são apresentadas no Quadro 5.21.

Quadro 5.21 – Médias parciais dos parâmetros físico-químicos dos sistemas

ETAR	CBO_5	CQO	SST	P	N
Madeira	171	329	287	…..	…..
Alcochete	97	1009	62	3	61
Aranhas	298	610	570	6	80
Condeixa	159	409	316	11	132
Guarda	403	880	408	8	107
Penacova	554	937	290	12	78
Rossas	516	1076	631	17	120
Salamonde 2	267	474	257	11	97
Salvador	524	889	366	8	125
Vila de Rei	251	618	238	…..	…..

Foram também calculadas as médias dos parâmetros analisados em todas as amostras das águas residuais e estão apresentadas no Quadro 5.22. Não se trata da média aritmética dos valores constantes no Quadro 5.21, mas a média de todos os valores registado à entrada das ETAR's.

Quadro 5.22 – Concentrações médias dos parâmetros físico-químicos analisados

Concentração	CBO_5 (E) (mg/L O_2)	CQO (E) (mg/L O_2)	SST (E) (mg/L)	pH (E) (Escala Sorensen)	P (E) (mg/L P)	N (E) (mg/L N)
Média	354	718	393	7,3	10	102

No Quadro 5.23 é apresentada a caracterização constante em Metcalf & Eddy (Metcalf & Eddy, 1995) e comparadas as concentrações obtidas com as apresentadas por este autor.

Quadro 5.23 – Composição típica das águas residuais domésticas não tratadas (Metcalf & Eddy, 1998)

Parâmetros	Concentração (mg/L)			Concentração média obtida neste trabalho (mg/L)
	Baixa	Média	Forte	
CBO_5	110	190	350	354
CQO	250	430	800	718
SST	120	210	400	393
P	4	7	12	10
N	20	40	70	102

O Quadro 5.23, decompõe as águas residuais brutas em 3 categorias diferentes consoante as concentrações dos parâmetros analisados, em: baixa, média e forte. A composição das águas residuais que entram nos sistemas estudados tem concentrações consideradas fortes, para qualquer um dos parâmetros analisados, com excepção do fósforo que se situa no intervalo médio-forte.

5.3.2 – Análise do desempenho dos sistemas

Os valores elevados dos parâmetros CBO_5, CQO, SST, P e N, que se registaram várias vezes em muitos dos sistemas, revelam a provável existência de outro tipo de afluentes ligados às redes de drenagem de águas residuais domésticas, uma vez que de acordo com os valores referidos no Quadro 5.21, estes sistemas apresentam valores muito superiores à concentração classificada como forte. Esta possibilidade interfere com o normal funcionamento desses sistemas, mas apesar de tudo, conseguem-se valores de eficiências bastante elevados.

No Quadro 5.24 estão registadas as médias das eficiências de cada um dos parâmetros analisados nestes 10 sistemas estudados.

Quadro 5.24 – Médias de eficiência dos sistemas estudados

ETAR	CBO_5 (%)	CQO (%)	SST (%)	P (%)	N (%)	Planta
Madeira	91	76	76	…..	…..	*Phragmites*
	94	76	85	…..	…..	*Typha*
	93	80	83	…..	…..	*Juncus*
Alcochete	**70**	66	**55**	**27**	50	*Phragmites*
Aranhas	78	76	80	38	56	*Phragmites*
Condeixa	75	**65**	81	38	48	*Lírio e Typha*
Guarda	84	77	79	31	61	*Phragmites*
Penacova	89	82	84	30	**34**	*Phragmites*
Rossas	**95**	**91**	**97**	**95**	**72**	*Phragmites*
Salamonde 2	85	81	91	66	61	*Phragmites*
Salvador	83	80	82	33	61	*Phragmites*
Vila de Rei	86	68	88	…..	…..	*Phragmites*
Média	85	77	82	45	55	
Referência Bibliográfica	50 a 95 (Relvão)	82 a 88 (Oliveira)	60 a 98 (Relvão)	15 a 68 (EPA)	24 a 70 (EPA)	Macrófitas

Relativamente ao parâmetro **CBO_5** verifica-se que as 10 ETAR's analisadas conseguem cumprir os valores limite de descarga em cerca de metade das análises, sendo a média da eficiência de remoção

superior aos 70%. O sistema que melhores resultados de eficiência apresenta é o de Rossas - Vieira do Minho, com o valor médio de 95%, e o pior é o sistema de Alcochete, com 70%.

A avaliação do parâmetro **CQO** revela um comportamento semelhante ao do CBO_5, embora as eficiências sejam ligeiramente inferiores, mas sempre com valores superiores a 55%, sendo a maior delas atingida também no sistema de Rossas, com o valor de 98%. Os resultados obtidos nestas análises contrariam o que é dito no capítulo 3 sobre a remoção do CQO nos meses mais frios, pois não se verifica que diminua proporcionalmente com a temperatura ambiente.

Verifica-se em todos os sistemas que os valores registados dos **SST** muito raramente excedem o valor limite estipulado pela legislação (60 mg/L), obtendo-se médias de remoção entre os 65 e os 95%, estando de acordo com os valores apresentados nas referências bibliográficas referidas no capítulo 3. No entanto, ocorrem com alguma frequência colmatações nos leitos de macrófitas, que podem ser devidas, na maior parte das vezes, à acumulação das lamas da fossa séptica ou do tanque Imhoff, que devem ser removidas com alguma frequência para que o pré-tratamento se possa realizar em perfeitas condições.

Da análise do Quadro 5.24, pode ainda verificar-se que os valores mais baixos de eficiência dos sistemas estudados ocorrem no sistema de Alcochete, para CBO_5 com 70%, SST com 55%, P com 27%, Condeixa para CQO com 65%, Penacova para P com 26% e Penacova para N com 34%.

Os valores obtidos nos sistemas estudados apontam para eficiências de remoção semelhantes aos valores de referência apresentados na literatura, tendo para CBO_5, CQO e SST percentagens médias de remoção de 85%, 77% e 82%, respectivamente. Para o fósforo obtiveram-se remoções médias de 45% e azoto 55%.

Curiosamente, as ETAR's onde se verificam os melhores e os piores resultados de CBO, SST e P (Rossas e Alcochete, respectivamente) utilizam o mesmo tipo de plantas, *Phragmites*, e qualquer um dos sistemas foi projectado e construído pela mesma empresa, com o mesmo critério de dimensionamento. Pode deduzir-se que a qualidade e as características de um efluente tratado são resultado, não só do projecto e da respectiva construção, mas também em grande parte da exploração e manutenção do sistema.

Os valores de **pH** tiveram pouca variação, com um valor médio de 7, como seria de esperar num processo biológico aeróbio, sendo favorável ao desenrolar dos processos microbianos e respeitando os valores limite de descarga impostos pela legislação.

A maior remoção de **fósforo total (P_t)** ocorreu no sistema de Rossas – Vieira do Minho, plantado com *Phragmites* e em que foi utilizada uma área de leito de 2,4m^2 por habitante. Acontece também esporadicamente que a eficiência de remoção de P é negativa, só que os valores são tão baixos que o valor limite de descarga não chega a ser ultrapassado. Contrariando o que é dito no capítulo 3, em 3.1 Tratamento biológico, nestes casos estudados não se verifica que a eficiência vá diminuindo ao

longo dos anos de funcionamento do sistema, muito pelo contrário, na generalidade ou aumenta ou mantém as percentagens de remoção.

Da observação dos valores do **azoto total (N_t)**, verifica-se que a sua remoção quase nunca cumpre os valores limite de descarga, acontecendo mesmo ocasionalmente o aumento da concentração do efluente à saída do leito de macrófitas. No entanto, é importante referir que existem muitas percentagens de remoção bastante elevadas, mas devido às grandes concentrações de azoto à entrada do sistema, os leitos de macrófitas não conseguem na maior parte dos casos obter valores inferiores a 15 mg/L N.

Da análise dos resultados anteriormente apresentados é possível dizer que estes sistemas têm um bom desempenho na remoção de CBO_5, fósforo e azoto total, um desempenho muito bom para os SST e um desempenho médio para a CQO. Pode mesmo dizer-se que as remoções de alguns parâmetros não foram as esperadas, devido às concentrações demasiado elevadas do afluente, apontando para a possibilidade de haver ligação de águas residuais clandestinas. Também se verificou que na maioria dos sistemas estudados são utilizadas as *Phragmites,* e os resultados obtidos variam bastante nas eficiências atingidas, sendo muito eficientes, mas por vezes não são eficazes, isto é, têm uma boa taxa de remoção (eficiência) mas nem sempre cumprem os valores limite de descarga (eficicácia).

Verifica-se que as análises efectuadas aos sistemas cumprem, na maioria das vezes, as condições impostas pelo Decreto-Lei nº 236/98, de 1 de Agosto, relativamente aos valores limite de emissão (VLE) na descarga de águas residuais. No Quadro 5.25 apresenta-se a percentagem de incumprimentos verificados nos diversos sistemas e a média de incumprimentos nos sistemas estudados.

Quadro 5.25 – Percentagem de incumprimentos verificados

ETAR	% de Incumprimentos				
	CBO	CQO	SST	P	N
Madeira	0	0	0	….	….
Alcochete	20	40	0	0	60
Aranhas	33	23	0	0	68
Condeixa	12	12	12	8	75
Guarda	39	25	4	0	73
Penacova	47	17	0	31	100
Rossas	0	0	0	0	69
Salamonde 2	7	7	4	0	69
Salvador	65	60	5	0	80
Vila de Rei	30	40	5	….	….
Média	25	22	3	5	74

A análise do Quadro 5.25 permite concluir que há sistemas a funcionar muito bem, conseguindo percentagens de incumprimento reduzidas, praticamente nula para SST e para fósforo, relativamente

baixa para CBO_5 e CQO, mas elevada para azoto. No entanto, há ainda a referir que a concentração do azoto das águas residuais afluentes aos sistemas é bastante superior ao valor médio dessas mesmas águas consideradas fortes, e que apesar de tudo se consegue atingir uma eficiência média de remoção de 55%.

Apesar da variância dos resultados dos casos práticos anteriormente referidos e do desconhecimento de muitos factores condicionantes e determinantes no funcionamento dos leitos de macrófitas estudados, pode concluir-se que existe potencialidade neste tipo de tratamento de águas residuais domésticas, dando estes valores bastante crédito a estes sistemas, uma vez que contribuem de uma forma natural e sem impactes negativos para a melhoria da qualidade do ambiente e, consequentemente da qualidade de vida do Homem.

5.4 – Síntese dos inquéritos às ETAR's e discussão de resultados

No Quadro 5.26 apresenta-se um resumo geral dos 20 sistemas que foram alvo de estudo, das suas características e do seu funcionamento. De um modo geral, estão em funcionamento desde finais dos anos 90, servem populações entre os 100 e os 1000 habitantes e na maioria das vezes possuem uma fossa séptica como órgão de pré-tratamento.

Quadro 5.26 – Síntese dos inquéritos realizados a 20 sistemas de leitos de macrófitas

ETAR	Ano de funcionamento	Habitantes servidos	Área do sistema (m²)	Área dos leitos (m²)	Tipo de plantas	Nº leitos de macrófitas	Projecto	Execução	Pré Tratamento	Custo (euros)	Frequência de Análises	Manutenção	Dimensionamento	Problemas ocorridos	Carência
Alcochete	2001	500	4000	1764	*Phragmites*	4	Etarplan	Etarplan	F.S.	189500	Semestral	Sim	Kickuth	Não tem	1 ano
Aranhas	2004	437	4100	836	*Phragmites*	1	Proengel	Edioc	F.S.	…….	Mensal	Sim	……..	Colmatação; Sólidos	1 ano
Arganil	2002	109	800	160	*Junco*	1	Empresa	Tricivil	F.S.	41000	Anual	Não	……..	Colmatação; sólidos	6 meses
Carregal do Sal	1998	200	655	338	*Phragmites*	2	Etarplan	Etarplan	F.s.	--------	Trimestral	Sim	Kickuth	Colmatação	6 meses
Condeixa	2002	600	4600	1600	*Lírio e Typha*	1	GAT	Empresa	T.I.	144500	Trimestral	Sim	Relvão	Colmatação	6 meses
Covilhã	1999	840	2398	1045	*Typha*	1	C.M.	Empresa	T.I.	99760	…….	Não	…….	Colmatação; Sólidos	1 ano
Grândola	2000	500	1100	500	*Phragmites*	1	GAT	Empresa	F.S.	82182	…….	Não	…….	Colmatação	…….
Guarda	1999	1160	2500	2500	*Phragmites*	2	C.M.	C.M	F.S.	130000	Mensal	Sim	Relvão	Colmatação; Odores	1 ano
Madeira	2003	200	541	441	*Phragmites, lírio e junco*	3	C.M.	D.Regional	F.S.	130000	Mensal	Sim	…….	Não tem	1 ano
Mealhada	2000	125	1000	350	*Phragmites*	1	Etarplan	Etarplan	F.S.	38513	Mensal	Sim	Kickuth	Colmatação	6 meses
Odemira	2001	350	1360	714	*Phragmites*	2	GAT	Empresa	F.S.	87040	Anual	Sim	……	Não tem	1 ano
Penacova	2001	500	3240	1860	*Phragmites*	2	C.M.	Empresa	T.I.	97266	Trimestral	Sim	Relvão	Colmatação	6 meses
Rossas	2001	600	1800	1444	*Phragmites*	4	Etarplan	Etarplan	F.S.	100802	Mensal	Sim	Kickuth	Não tem	……
Salamnde 1	1999	250	700	289	*Phragmites*	2	Etarplan	Etarplan	F.S.	64750	Sim	Sim	Kickuth	Não tem	……
Salamonde 2	2001	250	600	289	*Phragmites*	2	Etarplan	Etarplan	F.S.	--------	Mensal	Sim	Kickuth	Não tem	……
Salvador	2004	563	3100	630	*Phragmites*	2	Proengel	Edioc	F.S.	…….	Mensal	Sim	……	Colmatação; Sólidos	1 ano
St.Comba Dão	1999	300	1153	585	*Typha*	1	GAT	Empresa	F.S.	31159	Anual	Não	…….	Colmatação; Sólidos; Odores	……
Tondela 1 - Vale	1997	200	686	656	*Junco*	1	GAT	Empresa	F.S.	--------	Anual	Não	Relvão	Colmatação	1 ano
Tondela 2 - Adiça	1998	200	562	532	*Junco*	1	GAT	Empresa	F.S.	--------	Anual	Sim	Relvão	Colmatação	1 ano
Vila de Rei	2000	1054	4325	855	*Phragmites*	1	Empresa	Empresa	T.I.	185000	Trimestral	Sim		Colmatação; Odores	6 meses

Alguns sistemas não apresentam resultados de análises físico-químicos dos efluentes pela inexistência de monitorização e pelo funcionamento deficiente dos leitos de macrófitas, verificando-se que em quase todos os sistemas ocorrem problemas de colmatação dos leitos. De acordo com as informações prestadas pelos técnicos responsáveis, uma das principais causas deve-se a uma deficiente exploração e manutenção dos sistemas. Quando o órgão de pré-tratamento é o tanque Imhoff, verifica-se uma grande passagem de sólidos para o leito de macrófitas, provocando colmatações, que podem originar o encharcamento do leito e, como consequência, o aparecimento de odores ou até mesmo a morte das plantas e total ineficácia do sistema. Assim, o desempenho dos leitos de macrófitas deve ser monitorizado, designadamente através de análises periódicas à qualidade do efluente à entrada e à saída, podendo avaliar-se o seu desempenho, eficiência e controlo do modo de funcionamento.

Em relação às espécies de plantas existentes nos sistemas de leitos de macrófitas estudadas, é mais comum o uso das *Phragmites*, sendo menos utilizados os *Juncus* e as *Typhas,* e muito pouco os lírios. As ETAR's construídas pela empresa Etarplan, utilizam sempre *Phragmites*, por admitirem que têm um melhor desempenho.

Na maioria dos casos estudados o funcionamento é considerado bom, havendo a registar um ou outro caso de problemas nos leitos relativos à sua colmatação parcial, isto é, ao nível da entrada do leito, onde é feita a distribuição das águas residuais. Este problema é muitas das vezes devido à má execução dos diversos elementos constituintes do sistema, bastando haver uma falha num dos elementos, para que todo o processo seja posto em causa e não seja possível atingir os objectivos inicialmente pretendidos.

No Quadro 5.26 é referida a carência dos sistemas, que diz respeito ao período de tempo que os leitos de macrófitas demoram a entrar em funcionamento considerado normal, depois da adaptação das plantas ao meio envolvente e às características das águas residuais. Em geral, este período situa-se entre os 6 e os 12 meses, como é referido na maioria dos questionários.

A falta de manutenção e monitorização adequadas deverá ser um factor determinante para o desempenho observado, pois embora sejam sistemas pouco exigentes durante a sua operação, as sucessivas falhas em certos cuidados periódicos pode conduzir a graves problemas de funcionamento, por vezes causadores do incumprimento das normas de descarga e consequente contaminação dos meios hídricos da região.

Cerca de metade dos sistemas utilizam só um leito de macrófitas, enquanto que a outra metade utiliza na maioria dois leitos. No entanto, apesar do sistema de Rossas ter 4 leitos e ser considerado o que apresenta melhores desempenhos, o sistema de Alcochete também possui 4 leitos e tem eficiências bastante mais baixas. O número de leitos tem vantagens, principalmente, quando se pretende efectuar operações de manutenção num dos leitos, pois este tem que ficar inactivo durante o período de manutenção, e caso exista outro leito, fica garantida a continuidade do seu funcionamento.

Relativamente aos projectos destes sistemas constata-se que cerca de metade foram concebidos por instituições públicas e os restantes por empresas privadas, mas a execução é praticamente em todos os sistemas, da responsabilidade destas últimas. Não foi possível apurar todos os critérios utilizados no dimensionamento dos leitos de macrófitas estudados, por falta de informação das actuais entidades gestoras dos sistemas e também por sigilo profissional de algumas empresas.

Analisaram-se mais detalhadamente as áreas dos diversos sistemas e os respectivos custos associados, apresentados no Quadro 5.27. As áreas referidas dividem-se em 4 tipos, correspondendo à área total ocupada pelo sistema (1); área total do sistema em m^2 por habitante (2), calculada através do quociente entre a área total e o número dos habitantes servidos pelo sistema; área exclusivamente ocupada pelos leitos, onde estão plantadas as macrófitas (3); área dos leitos em m^2 por habitante (4), correspondendo exclusivamente à zona onde as macrófitas estão plantadas. Foram também calculados 3 tipos de custos respeitantes ao custo total do sistema por m^2 (1), que representa o custo total do sistema pela área ocupada; custo total do leito por m^2 (2), correspondente ao produto da área dos leitos pelo custo por m^2; custo total do sistema por habitante (3), que foi obtido dividindo o custo total dos sistemas pelos habitantes que serve. O Quadro 5.27 permite avaliar os custos e as áreas necessárias para implementar este tipo de sistemas para uma determinada população a servir.

Esta individualização da área dos leitos em relação à área total do sistema é muito importante, porque se verificou que muitos sistemas ocupam grandes áreas, que na realidade correspondem a zonas de passeios e circulação, não menos importantes, mas que podem ter uma área menor ao que muitas vezes se constata, o que encarece bastante o sistema de tratamento através de leitos de macrófitas.

Do Quadro 5.27, conclui-se que se tratam de sistemas que ocupam uma área média de 4,5 m^2 por habitante (área total do sistema), e uma área parcial, relativa aos leitos de 1,9 m^2 por habitante, aproximadamente. Relativamente à área de leito ocupada, traduzida em m^2 por habitante, os valores variam entre os 0,8 e os 3,5 m^2/hab, mostrando grandes diferenças de área, parecendo razoável olhar-se para estes sistemas considerando o valor médio de 2 m^2/hab. Se se verificar ainda as eficiências demonstradas por cada um destes sistemas, chega-se à conclusão que o sistema com menor área/habitante tem melhores resultados que o sistema com maior área/habitante (caso de Vila de Rei e Alcochete, respectivamente).

O custo médio de investimento ronda os 246 euros por habitante, embora os valores apresentados sejam um pouco díspares. Em comparação com os sistemas de tratamento de águas residuais convencionais, por exemplo, Tratamento Biológico por Leitos Percoladores, cujo custo por habitante é na ordem dos 270 euros por habitante e ocupa uma área relativa aos órgãos de tratamento de 0,13 m^2 por habitante (valores resultantes da média de 3 sistemas situados no Norte de Portugal), pode concluir-se que o sistema convencional é significativamente mais vantajoso em termos de área, mas mais dispendioso em termos de custos iniciais.

Quadro 5.27 – Análise de áreas e dos custos de investimento dos sistemas de leitos de macrófitas

ETAR	Habitantes	Área				Custo			Grau de satisfação 0 - 5
		Total (1)	Total sistema (2)	Leitos (3)	Leito (4)	Total/m² (1)	Total/m² leito (2)	Total/Hab (3)	
		m²	m²/hab	m²	m²/hab	euros	euros	euros	
Madeira	200	541	2,7	294	1,5	294	442	650	4
Alcochete	500	4000	8,0	1764	3,5	47	107	379	3
Aranhas	437	4100	9,4	836	1,9	…….	…….	……..	4
Condeixa	600	4600	7,7	1610	2,7	37	90	285	3
Penacova	600	3240	5,4	1860	3,1	30	52	162	3
Rossas	600	1800	3,0	1444	2,4	56	70	168	3
Salamonde 2	250	600	2,4	289	1,2	.....	.....	.....	3
Salvador	563	3100	5,5	630	1,1	…….	…….	……..	4
Vila de Rei	1054	4325	4,1	855	0,8	43	216	176	2
Arganil	109	800	7,3	160	1,5	51	256	376	2
Carregal do Sal	200	655	3,3	338	1,7	.....	.....	.....	3
Covilhã	840	2398	2,9	1045	1,2	41	95	119	3
Grândola	500	1100	2,2	500	1,0	75	164	164	1
Guarda	3000	2500	0,8	2500	0,8	52	52	43	3
Mealhada	125	1000	8,0	350	2,8	39	110	308	3
Odemira	350	1360	3,9	714	2,0	64	121	249	1
Salamonde 1	250	700	2,8	289	1,2	72	224	259	3
St. Comba Dão	300	1153	3,8	585	2,0	27	53	103	2
Tondela 1	200	686	3,4	656	3,3	.....	.....	.....	2
Tondela 2	200	562	2,8	532	2,7	.....	.....	.....	2
Média	**544**	**1961**	**4,5**	**863**	**1,9**	**66**	**147**	**246**	**3**
Desvio Padrão	629	1442	2	644	1	67	108	153	1

Também os custos de exploração e manutenção, são mais elevados nos sistemas convencionais, pois necessitam de mão de obra especializada, diária e permanente, de pelo menos um operador, com custos consideráveis de energia eléctrica, e requerem ainda com alguma frequência a manutenção dos equipamentos electromecânicos afectos ao sistema (Vymazal, 2002). Estudos efectuados mostram que os custos energéticos associados a uma ETAR de leitos de macrófitas são relativamente reduzidos, quando comparados com sistemas convencionais especialmente relevantes para populações inferiores a 500 habitantes (Galvão e Matos, 2004).

Os valores obtidos para o custo total do sistema por m^2 variam entre os 27 e os 294 euros, numa média de 66 euros por m^2, e os valores para o custo por habitante varia entre 43 e 650 euros, verificando-se uma grande discrepância de resultados entre os vários sistemas analisados. Esta constatação pode ser explicada pelo facto de alguns sistemas terem sido projectados e construídos pelos próprios municípios (os menos dispendiosos, com excepção do sistema da Madeira), e os que foram executados por empresas da especialidade (os mais caros).

Da análise destes sistemas, conclui-se que os critérios de dimensionamento utilizados são diferentes, porque os resultados da relação habitante/área ocupada (m^2) são díspares. Os poucos casos em que é referido o tipo de dimensionamento, são os projectados pelo GAT de Coimbra, que apoia a sua base de dimensionamento nos critérios definidos por Relvão, e os sistemas que foram construídos pela empresa Etarplan, que baseia a sua teoria na tecnologia Kickuth, embora se verifique que mesmo nestes sistemas a relação área/habitante é variável, os casos de Alcochete, Vieira do Minho e Arganil. Este facto foi explicado pela empresa, referindo que tal variação se deve a factores de cálculo, inerentes ao tipo de afluente, isto é, às suas características, tais como carga orgânica e caudal por habitante por dia. Deste modo, resultam valores distintos, uma vez que os efluentes são diferentes e os consumos populacionais também variam bastante consoante a zona em que se enquadram. No caso do sistema de Alcochete atingiu-se o valor de 3,5 m^2 de leito por habitante, porque as capitações são da ordem dos 200 L/hab/dia, embora a carga orgânica se mantenha igual, enquanto que no caso de Rossas é de 2,4 m^2 de leito por habitante, tendo considerado valores de capitação inferiores.

A variação dos custos das diferentes ETAR's construídas pela mesma empresa, no caso, Etarplan, tem várias justificações. Por um lado tem importância o ano em que foram construídas, o custo de materiais, a mão-de-obra, os movimentos de terra, etc., e por outro lado a dimensão da obra, pois quanto maior esta for, menos custo tem proporcionalmente. Depois há também o caso de se aproveitarem algumas fossas sépticas existentes, diminuindo o custo da obra, e outras vezes são incluídos no sistema, além do órgão de pré-tratamento, os leitos de secagem das lamas da fossa séptica.

Citando ainda este autor, pode dizer-se que o recurso a leitos de macrófitas para tratamento biológico de efluentes, realizado com base em processos naturais e de escoamento gravítico, é uma solução com elevada eficiência energética, cuja manutenção é consideravelmente inferior à dos sistemas convencionais. Deste modo, as características apresentadas colocam os leitos de macrófitas como alternativa de tratamento sustentável, em particular devido às suas múltiplas funções, baixos custos e reduzidos impactes ambientais que apresentam.

Uma das principais vantagens do recurso a leitos de macrófitas diz respeito aos reduzidos custos energéticos associados, especialmente relevantes para populações inferiores a 500 habitantes e tendo em conta que em muitos concelhos do país mais de metade dos aglomerados populacionais apresentam populações inferiores a 2000 habitantes, o saneamento destas povoações contribuirá certamente para uma melhoria da qualidade das águas interiores e costeiras do nosso país (Matos, 2004).

5.5 – Principais problemas observados

Os inquéritos realizados às entidades gestoras dos sistemas estudados permitiram fazer o levantamento dos principais problemas associados ao funcionamento. Esses problemas estão muitas vezes relacionados, pois a ocorrência de uns determina o aparecimento de outros, podendo mesmo a sua origem estar relacionada com algumas regras essenciais a ter em atenção, tal como foi referido no capítulo 3, nomeadamente:

- Manutenção deficiente dos sistemas: limpeza das grelhas de entrada, limpeza e lavagem das tubagens de distribuição e recolha; intervenção atempada e adequada na resolução de problemas;
- Colmatação dos leitos, que se traduz na sua inundação superficial e leva à perda de eficiência dado que os poros do leito deixam de estar livres para permitir a percolação do efluente a tratar;
- Incumprimento das normas de qualidade da água na descarga, originada pela ausência de monitorização e análises periódicas à entrada do sistema de pré-tratamento e à entrada e à saída do leito de macrófitas, de modo a permitir a avaliação do desempenho do sistema de pré-tratamento (para prevenir problemas de colmatação devido à introdução no leito de cargas contaminantes demasiado elevadas, principalmente de sólidos);
- Deficiências no desenvolvimento das macrófitas plantadas, apresentando uma taxa de crescimento superior no início do leito, sendo o restante ocupado predominantemente por espécies invasoras;
- Morte das plantas, originada pela colmatação do leito e consequente passagem do efluente por "by-pass";
- Ligação de efluentes clandestinos, alterando as características das águas residuais domésticas e dificultando a remoção dos contaminantes e poluentes.

Este levantamento mostrou que somente 30% dos sistemas se apresentaram sem problemas de funcionamento, cerca 25% não têm manutenção, 70% apresentaram colmatação dos leitos, 25% apresentaram passagem de sólidos para os leitos e 15% registaram a presença de odores. Foram ainda referidas ligações de efluentes clandestinos e deficiências no desenvolvimento das macrófitas plantadas, que por vezes pode levar à sua morte.

5.6 – Acções preventivas

Melhor do que proceder às acções correctivas propostas no ponto 5.7, será agir de forma preventiva, na tentativa de evitar muitos dos problemas, diminuindo custos de manutenção e paragens no processo de tratamento, que poderiam conduzir a desastres ecológicos.

Começando pela fase inicial, que corresponde ao projecto, é muito importante fazer um estudo exaustivo de todos os factores intervenientes no processo, de acordo com o referido no capítulo 4. Para além dos objectivos pretendidos da qualidade final da água, devem ser previstos, na medida do possível, os problemas que possam surgir no decorrer das fases de construção e operação, bem como os meios e as infra-estruturas apropriadas à correcta manutenção e monitorização, de resto tão importantes como um correcto dimensionamento. Os planos de construção e as especificações desenvolvidas a partir dos diversos requisitos exigidos para se obter um adequado tratamento, devem ser cuidadosamente analisados, e a construção deve seguir rigorosamente as indicações do projecto (EPA, 2000b).

Como o funcionamento dos leitos de macrófitas depende da existência de grande condutividade hidráulica, devem ser tomadas precauções para que não ocorra a compactação do leito, evitando o tráfego pedestre e a maquinaria sobre esses mesmos leitos. No final da plantação, os leitos devem ser cobertos com água até à superfície e todos os componentes devem ser testados, de modo a assegurar que operam correctamente. Quando as plantas começarem a enraizar, o nível da água deve ser diminuído gradualmente, até ao nível desejado. A monitorização periódica é essencial para o bom funcionamento dos leitos de macrófitas, através da medição dos caudais e da avaliação da qualidade dos efluentes.

5.7 – Acções correctivas

Depois de identificados os principais problemas observados e a sua origem, torna-se importante definir medidas passíveis de utilizar com o objectivo de os corrigir, ou, de algum modo minimizar.

5.7.1 – Colmatação do leito

A colmatação do leito pode ser de origem superficial ou sub-superficial. No primeiro caso dá-se devido à acumulação de sólidos, lamas ou detritos provenientes da senescência das plantas. No segundo caso, a colmatação surge sobretudo da diminuição da condutividade hidráulica, que está intimamente ligada à composição do leito, isto é, à dimensão das partículas que o compõem e à natureza do material de enchimento.

No caso de colmatação superficial, é necessário limpar os detritos das plantas ou promover a secagem da fracção colmatada, levando a que estas mineralizem e se tornem mais susceptíveis de remoção aquando da passagem do efluente.

Em sistemas de fluxo sub-superficial, quando ocorre a colmatação do leito, deve fazer-se uma paragem no sistema de tratamento, desactivando-o. Daí ser importante considerar pelo menos 2 leitos, para encaminhar todo o efluente só para um deles, evitando a descarga do efluente não tratado no meio receptor e a sua consequente contaminação, permitindo o funcionamento do sistema,

enquanto se efectuam reparações no leito inactivo. Esta opção é utilizada apenas em 5 das ETAR's estudadas, verificando-se que 2 delas não apresentam problemas de colmatação.

Há ainda a possibilidade de evitar a colmatação dos leitos, fazendo a recirculação do efluente tratado, ao sair do leito, para diluir os contaminantes à entrada do sistema, de modo a que se faça uma diluição da carga que aflui ao sistema.

5.7.2 – Colmatação das tubagens

Pode verificar-se o entupimento das tubagens de distribuição à entrada do leito, sendo necessário a sua limpeza periódica, pelo que deve estar implementado um dispositivo que permita intervir em caso de ocorrer a colmatação, de modo a poder remover o material que está a obstruir os tubos.

5.7.3 – Incumprimento dos requisitos legais de descarga

Como se verificou anteriormente, nem todos os sistemas possuem análises dos efluentes, e os que têm geralmente só analisam os parâmetros CBO_5, CQO, SST, pH, P e N, não permitindo uma caracterização completa do efluente, nem detectar possíveis ligações clandestinas de efluentes industriais ou de outro tipo, que podem prejudicar o tratamento ou contaminar o meio receptor. Uma das soluções que pode impedir que o efluente seja descarregado sem estar devidamente tratado, é a possibilidade de o fazer recircular, de modo a reiniciar o tratamento.

5.7.4 – Desenvolvimento das plantas

Pode também ser problemático o fraco desenvolvimento das plantas e a consequente ocupação de grande parte do leito por infestantes, cujas raízes durante o seu crescimento podem vir a romper a tela impermeabilizante, criando problemas de infiltração e contaminação do solo. Muitas vezes estes problemas resultam de outros, como por exemplo, da colmatação do leito ou da insuficiência de caudal afluente. As colmatações conduzem a escoamentos preferenciais e fazem acumular os nutrientes e a matéria orgânica à entrada do leito. Por outro lado, a insuficiência de caudal afluente pode originar um deficiente desenvolvimento das plantas. Assim, o desenvolvimento das plantas deve ser controlado através das acções correctivas aplicadas à colmatação do leito e das tubagens.

6 – CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

O sistema de tratamento de águas residuais através de leitos de macrófitas de fluxo sub-superficial horizontal surge ligado a pequenos aglomerados populacionais onde se torna inviável ou bastante oneroso construir um sistema de tratamento de águas residuais convencional. A versatilidade de construção de um sistema deste tipo, a adaptabilidade da forma dos leitos de acordo com a disponibilidade do terreno e a sua topografia, torna-os vantajosos, contribuindo para a descentralização do tratamento, sem encargos energéticos, aditivos químicos ou ainda, mão de obra especializada na sua manutenção.

O levantamento dos métodos de dimensionamento apresentados por alguns autores permitiu concluir que a determinação da secção transversal dos leitos de macrófitas é feita a partir da Lei de Darcy. Todos eles consideram que esta Lei descreve bem as condições hidráulicas dos leitos de fluxo sub-superficial horizontal.

Todos os autores, excepto a EPA (EPA, 2000a) apresentam para a determinação da área superficial dos leitos, um modelo baseado na equação cinética de primeira ordem que descreve um reactor biológico de fluxo contínuo de escoamento tipo “êmbolo”, para remover a matéria orgânica. No entanto, a expressão proposta pela EPA, não obstante não ter a mesma forma, baseia-se nos mesmos princípios, ou seja, considera, no cálculo da área superficial do leito, o caudal, a concentração do parâmetro considerado relevante para o dimensionamento (CBO_5, SST, N e P), e a taxa de remoção desse parâmetro.

As diferenças encontradas entre os métodos apresentados por Reed *et al*, Relvão e Metcalf & Eddy centram-se nos valores utilizados para a constante cinética de primeira ordem (K_T) utilizada (equação 4.2), uma vez que θ assume valores diferentes, consoante o autor.

O estudo apresentado neste trabalho, que engloba a análise da monitorização de dez sistemas de tratamento, permitiu:

- Fazer a caracterização das águas residuais brutas, provenientes de pequenos aglomerados, e compará-la com a constante na bibliografia. As águas residuais de pequenos aglomerados em Portugal podem ser classificadas como fortes, uma vez que apresentam concentrações muito elevadas dos parâmetros analisados.
- Fazer a avaliação da eficiência dos leitos de macrófitas no tratamento de águas residuais domésticas, particularmente na remoção de CBO_5, CQO, SST. No estudo efectuado constatou-se que as percentagens de remoção dos poluentes analisados foram elevadas, sendo os valores médios de remoção de 85% para CBO_5, de 77% para CQO e 82% para SST. Relativamente ao Azoto, embora na maior parte das vezes não se consiga cumprir os valores limite de descarga, atingem-se elevadas percentagens de remoção, um valor médio de 55%. O

caso do Fósforo é exactamente o oposto, pois apesar de apresentar valores inferiores aos limites legalmente estabelecidos, tem percentagens de remoção mais baixas, aproximadamente 45%.

Baseado no estudo de mais dez sistemas (total de vinte), foi possível determinar as áreas médias *per capita* ocupadas pelos dos sistemas, bem como as áreas médias *per capita* ocupadas pelos leitos, tendo-se obtido uma área média de 4,5 m^2 por habitante e 1,9 m^2 por habitante, respectivamente. O custo médio de instalação ronda os 246 euros por habitante, embora os valores apresentados sejam bastante díspares. Fez-se a comparação do custo e da área ocupada pelos órgãos de tratamento destes sistemas com os de Leitos Percoladores, tendo-se concluído que o custo de instalação é cerca de 10% mais baixo, ocupando no entanto, os órgão de tratamento uma área cerca de 90% superior.

Os inquéritos realizados às entidades gestoras dos sistemas permitiram ainda fazer o levantamento dos principais problemas associados ao funcionamento dos sistemas estudados, bem como propor soluções preventivas e correctivas. Este levantamento mostrou que somente 30% dos sistemas se apresentaram sem problemas de funcionamento, cerca de 25% não efectuam manutenção dos sistemas, 70% apresentaram colmatação dos leitos, 25% permitem a passagem de sólidos para os leitos e 15% detectaram a presença de odores. Pode também concluir-se que há sistemas a funcionar muito bem, conseguindo percentagens de incumprimento reduzidas para os SST e para o fósforo, relativamente baixas para a CBO_5 e CQO, e elevadas para o azoto. Foi ainda referido a ligação de efluentes clandestinos e a deficiência no desenvolvimento das macrófitas plantadas, que por vezes pode levar à sua morte.

A conclusão geral deste trabalho é que os leitos de macrófitas de fluxo sub-superficial horizontal são uma tecnologia que garante um tratamento eficaz das águas residuais domésticas, com baixos custos de investimento, de exploração e de manutenção, que não necessitam de técnicos especializados para acompanhamento permanente do sistema. Aliás, verifica-se que apesar da maioria dos sistemas terem uma manutenção deficiente, só em casos muito pontuais não cumprem os valores limites de descarga. Tanto na implantação como na operação, estes sistemas de tratamento de águas residuais sobressaem pela sua simplicidade, pela pouca mecanização, pela economia e utilizando a designada Ecotecnologia, que como o nome indica, trata-se de uma tecnologia ecológica e sustentável, tão referida nos dias de hoje como um objectivo e meta a atingir.

Tratando-se de um sistema de baixa tecnologia e baixos custos, está convenientemente indicado para se poder implementar em pequenos aglomerados, que tendem a diminuir progressivamente e onde não são justificáveis grandes investimentos, onde o corpo técnico é insuficiente, principalmente em municípios de pequena dimensão. Por outro lado, trata-se de uma tecnologia que pode ser utilizada em sistemas já existentes que possuam fossa séptica ou tanque Imhoff para assegurar o tratamento primário, sendo que os leitos de macrófitas encarregar-se-ão do tratamento secundário e terciário.

Embora a função dos leitos de macrófitas seja o tratamento das águas residuais, conseguem valorizar a estética do local onde estão implantados, por causarem um bom impacte visual, sendo bem aceite pelas populações. Acresce ainda, que a constituição de ecossistemas baseados na utilização de macrófitas aquáticas, em espaços industriais e, ou urbanos, ao providenciar um suporte de diversas formas de vida pode permitir criar um valor estético apreciável, em particular no caso das plantas com flor (Rodrigues, 2004).

A evolução e adopção desta tecnologia poderiam ser generalizadas com o estabelecimento de normas nacionais, indicando procedimentos de projecto, construção e operação sobre estes tipos de sistemas, de modo a evidenciar as vantagens ao optar-se por um sistema deste tipo.

Apesar dos resultados obtidos neste estudo sobre os sistemas de tratamento de águas residuais através de leitos de macrófitas, poder-se-á dar continuidade a este trabalho:

- Desenvolvendo um modelo que descreva o comportamento hidráulico e hidrológico dos leitos de macrófitas, uma vez que a condutividade hidráulica é um parâmetro muito importante no dimensionamento, difícil de quantificar;
- Estudando a relação existente entre a eficiência dos sistemas e os métodos de dimensionamento utilizados, o tipo de plantas, o clima;
- Estudando um maior número de sistemas o que permitiria com maior fiabilidade generalizar algumas conclusões deste trabalho;
- Estudando um meio ou um tipo de planta que consiga aumentar a eficiência de remoção de fósforo e azoto.

A tecnologia dos leitos de macrófitas começa a ser utilizada para construção de piscinas biológicas, tratamento de águas pluviais e de lamas de ETAR, áreas de investigação com grande potencial de desenvolvimento no futuro.

BIBLIOGRAFIA

Afonso, N. (1999). *Águas Residuais - Usar Sem Abusar*, Água Hoje, 12,5, pp.28-31.

Alexandre, L. (2000). *Desnitrificação de Efluentes Industriais em Leitos Construídos de Macrófitas Suportadas em Leca*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Braga.

Ansola, G., González, J., Cortijo, R., Luís, E. (2003). *Experimental and full-scale pilot plant constructed wetlands for municipal wastewaters treatment.* Ecological Engineering 21 (2003) 43-52.

APRH – Associação Portuguesa de Recursos Hídricos (2006). *PEAASAR 2007 – 2013*. http://www.aprh.pt/congressoagua2006/PDF/pserra.pdf

Baptista, J. (2003). *Microbial Communities in Subsurface Flow Wetlands*. Proceedings of the 1st International Seminar on The Use of aquatic macrophytes for wastewater treatment in constructed wetlands. FCG, Lisboa, V. Dias and J. Vymazal, Lisboa, pp. 265-276.

Belgiorno, V. (2002). *Criteri di Progettazione di Impianti di Fitodepurazione a Flusso Sub-Superficiale*. VI Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental.

Borin, M., Tochetto, D. (2006). *Ornamental plants in sub-surface horizontal flow treatment system*. 10th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. Volume II, pp.1085–1092, Lisboa – Portugal.

Brix, H. (1994). *Use of Constructed Wetlands in Water Pollution Control: Historical Development, Present Status and Future Perspectives.* Water Science and Technology 30 (8), pp 209-223.

Brix, H. (2003). *Plants used in Constructed Wetlands and Their Functions*. In: Proceedings of the 1st International Seminar on The Use of aquatic macrophytes for wastewater treatment in constructed wetlands. FCG, Lisboa, V. Dias and J. Vymazal, Lisboa, pp. 8-109.

Chazarenc, F., Merlin, G., Gonthier, Y. (2003). *Hydrodynamics of horizontal subsurface flow constructed wetlands*. Ecological Engineering 21, 165-173.

Costa, L., Ceballos, B., Meira, C., Cavalcanti, M. (2003). *Eficiência de Wetlands construídos com dez dias de detenção hidráulica na remoção de colífagos e bacteriógafos.* Revista de Biologia e Ciências da Terra, Volume 3, nº1, 1º Semestre.

CCRC – Comissão de Coordenação da Região Centro, (1989). *Estações de Tratamento de Águas Residuais Para Aglomerados Com Menos De 5000 Habitantes.* Edição da Comissão de Coordenação da Região Centro.

Cui, Y., Jin, J., Tan, X.,Dong, C.,Zhu, B., Zhao, L. (2006). *Nutrients removal performance of subsurface flow constructed wetlands in cold climate.* 10 th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. Volume II, pp.861- 876, Lisboa – Portugal.

Davies, L., Vicente, P., Rodrigues, F., Novais, J., Martins-Dias, S. (2004). *Degradação de um corante azo num leito piloto vertical plantado com Phragmites sp.* Centro de Engenharia Biológica e Química, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.

DeBusk, W. (1999). *Wastewater Treatment Wetlands: Applications and Treatment Efficiency*. Soil and Water Science Department. Ifas Extension, University of Florida.

Dias, S. (1998). *Tratamento de efluentes em zonas húmidas construídas ou leitos de macrófitas*. Boletim de Biotecnologia nº60, 14-20.

Dias, S. (2000). *As Vantagens das Plantas*, Água Hoje, 19,7, pp.26-28.

Dias, V. Inácio, M., Pacheco, P., Lopes, J., Correia, P., Soutinho, E. (2000). *FitoETAR's : Pressupostos teóricos de funcionamento e tipos.* 9º Encontro Nacional de Saneamento Básico: Águas e Resíduos, oportunidades e desafios do programa operacional de ambiente, 2000-2006. Loures.

Dias, V.N. & Martins-Dias, S. (2003). *Constructed Wetland for Wastewater Treatment: The Portuguese Experience.* Proceedings of the 1st International Seminar on The Use of aquatic macrophytes for wastewater treatment in constructed wetlands. FCG, Lisboa, V. Dias and J. Vymazal, Lisboa, pp. 467-492.

EPA – Environmental Protection Agency, (1993). *Subsurface Flow Constructed Wetlands for WasteWater Treatment – A Technology Assessment.* EPA/832-R-93-008. Office of Water, Washington, DC.

EPA – Environmental Protection Agency, (2000a). Environmental Protection Agency – *Manual: Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters.* Office of Research and Development – EPA/625/R-99/010.

EPA – Environmental Protection Agency, (2000b). *Guiding Principles for Constructed Treatment Wetlands: Providing for Water Quality and Wildlife Habitat.* Office of Wetlands, Oceans and Watersheds. Washington, DC. EPA/843-B-00-003.

EPA – Environmental Protection Agency, (2000c). *Wastewater Technology Fact Sheet – Wetlands: Subsurface Flow.* EPA/832-F-00-023. Office of Water, Washington, DC.

EPA – Environmental Protection Agency, (2000d). *Wastewater Technology Fact Sheet –Free Water Surface Wetlands.* EPA/832-F-00-024. Office of Water, Washington, DC.

EPA – Environmental Protection Agency, (2001). *A Handbook of Constructed Wetlands – A Guide to Creating Wetlands for: Agricultural Wastewater, Domestic Wastewater, Coal Mine Drainage, Stormwater in the Mid-Atlantic Region* – USDA - Natural Resources Conservation Service e US Environmental Protection Agency, Region III. Volume I, Volume II.
Disponível em: http://www.epa.gov/owow/wetlands/pdf/hand.pdf (consultado em Maio 2005).

ETARPLAN (2003). *Sistemas de Tratamento adequados a pequenos aglomerados.* 1º Seminário do ciclo de seminários do Curso de Engenharia Civil da UTAD – Vila Real.

Ferreira, A. (2007). *Piscinas Biológicas*. Edição Bio Piscinas. Portugal.

Franco, J., Afonso, M. (1998). *Nova Flora de Portugal*. Editora Escolar. Lisboa.

Galvão, A., Matos, J. (2004). *Sustentabilidade de Pequenos Sistemas de Tratamento de Águas Residuais*. 7º Congresso da Água, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Lisboa.

Guia da Comissão Europeia (2001). *Guia dos Processos Extensivos de Tratamento das Águas Residuais adaptados a pequenas e médias aglomerações (500-5000 EH*). Aplicação da Directiva nº 91/271 de 21 de Maio de 1991 relativa a tratamento de águas residuais urbanas. Disponível em: http://www.oieau.org/portugal/index.htm (consultado em Setembro de 2004).

Harbel, R. (2003). *History of the use of Constructed Wetlands*. Proceedings of the 1st International Seminar on The Use of aquatic macrophytes for wastewater treatment in constructed wetlands. FCG, Lisboa, V. Dias and J. Vymazal, Lisboa, pp. 12_1-12_15.

Hortirelva. Disponível em http://www.hortirelva.pt/etares.htm. (consultado em Agosto de 2004).

INAG; (2007); *Relatório do Estado do Abastecimento de Água e da Drenagem e Tratamento de Águas Residuais em Sistemas Públicos Urbanos, Campanha INSAAR 2005*; Instituto da Água, Portugal.

Joly, A. (1993). *Botânica – Introdução à taxonomia vegetal*. Companhia Editora Nacional, III Série. São Paulo – Brasil.

Kadlec, R. (2003a). *Hidrology and Hydraulics of Constructed Wetlands*. Proceedings of the 1st International Seminar on The Use of Aquatic Macrophytes for Wastewater Treatment in Constructed Wetlands. FCG, Lisboa, V. Dias and J. Vymazal, Lisboa, pp. 111-136.

Kadlec, R. (2003b). *Status of Treatment Wetland in North America*. Proceedings of the 1st International Seminar on The Use of aquatic macrophytes for wastewater treatment in constructed wetlands. FCG, Lisboa, V. Dias and J. Vymazal, Lisboa, pp. 363-401.

Kickuth, R. (1998). *Processo de tratamento rizosférico segundo o Prof. Kickuth*. 4º Congresso da Água "A água como recurso estruturante do desenvolvimento". Lisboa, Portugal.

Mbuligwe, S. (2005). *Comparative treatment of dye-rich wastewater in engineered wetland systems (EWSs) vegetated with different plants.* Water Research 39, 271-280.

Mano, A.P., Franco, M., Barros, L., Antunes, R., Houghton, S. (2003). *Tratamento de águas residuais de pequenos aglomerados. Aspectos de concepção*. *Tecnologia da Água*. Edição I, pp. 22-26.

Matos, S. (2004). *Tecnologias para pequenos aglomerados*. Água & Ambiente, Junho, pp.66.

Metcalf & Eddy (1995). *Wastewater Engineering, Treatment, Disposal, Reuse*. Third Edition. International Edition Mcgraw-Hill, London.

Morais, L., Vymazal, J., Bartolomeu, F., Dias, V. (2003). *Operation Maintenance and Costs of Constructed Wetlands*. Proceedings of the 1st International Seminar on The Use of Aquatic Macrophytes for Wastewater Treatment in Constructed Wetlands. FCG, Lisboa, V. Dias and J. Vymazal, Lisboa, pp. 315-323.

Neves, E. (2000). *Imitar a Natureza*, Água Hoje, 19,7, pp.19-25.

Novais-Barbosa, J. (1986). *Mecânica dos Fluidos e Hidráulica Geral*. Volume 2. Porto Editora. Porto.

Oliveira, J. (1995). *A Lagunagem em Portugal: Conceitos básicos e aplicações práticas.* Edições Universitárias Lusófonas, Lda. Lisboa.

Oliveira, E., Malva, M., Pereira, R., Conceição, A., Castilho, G. (2006). *Constructed wetland system for wastewater treatment by using recycled EPS (expandable polystyrene) support medium*. 10 th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. Volume II, pp.1215-1222, Lisboa – Portugal.

Ozimek, T., Maszczyk., P. (2006) *Effect of phragmytes australis on soil processes in horizontal subsurface flow constructed wetland*. 10 th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. Volume II, pp.10351043, Lisboa – Portugal.

Puigagut, J., Villaseñor, J., Salas, J., Bécares, E., García, J. (2006). *Subsurface Flow Constructed Wetland in Spain for the Sanitation of Small Communities : a Comparative Study*. 10 th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. Volume II, pp.1223-1234, Lisboa – Portugal.

Quintela, A. (2000*). Hidráulica*. 7ª edição. Fundação Calouste Gulbenkian. Lisboa.

Reed, S.C., Crites, R., Middlebrooks, E. (1995). *Natural Systems for Waste Management and Treatment.* Second Edition. A McGRAW-HILL Special Reprint Edition.

Relvão, A. (1999). *Sistemas de Tratamento de Efluentes em Aglomerados Urbanos por Leitos de Macrófitas Emergentes*. Comissão de Coordenação da Região Centro, Coimbra 1999.

Ribeiro, J. (2007). *Estudo do Comportamento Hidráulico de Leitos de Macrófitas*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa.

Rodrigues, F., Catarino, J., Maia, A, Mendonça, E., Picado, A, Trancoso, M. (2004). *Macrófitas no Tratamento de Águas Residuais Urbanas*. INETI, Lisboa, Portugal.

Rousseau, D., Vanrolleghem, P., Pauw, N. (2004). *Constructed Wetlands in Flanders: a Performance Analysis*. Science Direct, Ecological Engineering 23, 151-163.

Santiago, E. (1999). Tratamento de Efluentes - Leitos de Macrófitas (Perspectivas e Realidades na Região Centro), *Águas e Resíduos*, Ano IV, Março 1999, pp.23-28.

Saraiva, I. (2001). *Construir jardins para tratar a água*. Tecnologias Ambientais, Março 2001, pp.12-15.

Serra, H. (1998). *Tratamento de Efluentes*. Tecnologias do Ambiente, 24,7, pp.8.

Sezerino, P., Bento, A., Alvarenga, R., Valente, V., Philippi, L. (2005a). *Filtro plantado com Typha spp de fluxo horizontal (constructed wetland) aplicado como polimento de efluente de lagoa facultativa.* 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária Ambiental.

Sezerino, P., Philippi, L. (2005b). *Filtro plantado com macrófitas (wetlands) como tratamento de esgotos em unidades residenciais – critérios para dimensionamento.* 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária Ambiental.

Silva, A. (1998). *Benefícios Ecológicos dos Grandes Caniçais Relativamente às ETAR's de Plantas*, Tecnologias do Ambiente, 24,7, pp.30.

Sousa, J., Haandel, A., Cabral, R. (2002). *Desempenho de Sistemas Wetlands no Pós-Tratamento de Esgotos Sanitários Pré-Tratados em Reactores UASB*. 10º Encontro Nacional de Saneamento Básico (SILUBESA) – Uso Sustentável da Água. U.M.-Braga.

Tchobanoglous, G. (2003). *Preliminary Treatment in Constructed Wetlands*. Proceedings of the 1st International Seminar on The Use of Aquatic Macrophytes for Wastewater Treatment in Constructed Wetlands. FCG, Lisboa, V. Dias and J. Vymazal, Lisboa, pp. 13-33.

Tchobanoglous, G., Crites, R., Gearheart, B., Principal, R. (2003). *A Review of Treatment Kinetics for Constructed Wetlands.* Proceedings of the 1st International Seminar on The Use of Aquatic Macrophytes for Wastewater Treatment in Constructed Wetlands. FCG, Lisboa, V. Dias and J. Vymazal, Lisboa, pp. 137-150.

Tomoko, Y., Ping, G., Ryuhe, I., Yoshitaka, E., Yuhei, I., Masatoshi, M. (2006). *Comparative analysis of constructed wetland systems with different plant species focused on performance of wastewater treatment and characteristics of greenhouse effect gases emission*. 10 th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. Volume II, pp.889-899, Lisboa – Portugal.

Tutin, T. (1980). *Flora Europaea*. Cambridge University Press. Cambridge.

UC – Universidade de Coimbra. *Herbário da Universidade de Coimbra*. Disponível em: http://www.uc.uc.pt/herbario_digital/Flora_PT (consultado em Setembro de 2007).

UTAD – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. *Flora Digital de Portugal*. Disponível em: http://aguiar.hvr.utad.pt/pt/herbario (consultado em Setembro de 2007).

Valentim, M., Roston, D., Job, S. (2002). *Sistema "In Loco" de baixo custo para tratamento de aguas residuais.* 10º Encontro Nacional de Saneamento Básico (SILUBESA) – Uso Sustentável da Água. U.M.-Braga.

Valentim, M., Roston, D. (2002). *Leitos cultivados ("Constructed Wetland"): Comparação entre valores obtidos para uma mesma vazão afluente em épocas distintas*. 10º Encontro Nacional de Saneamento Básico (SILUBESA) – Uso Sustentável da Água. Universidade do Minhho.-Braga.

Vymazal, J. (2002). *The use of sub-surface constructed wetland for wastewater treatment in the Czech Republic: 10 years experience.* Elsevier Science, Ecological Engineering 18, 633-646.

Vymazal, J. (2003a). *Sizing of gravel-based constructed wetlands with horizontal sub-surface flow*. Proceedings of the 1st International Seminar on the Use of aquatic macrophytes for wastewater treatment in constructed wetlands. Fundação Calouste Gulbenkian, , V. Dias and J. Vymazal (eds), Lisboa, pp. 185-193.

Vymazal, J. (2003b). *Types of constructed wetlands*. Proceedings of the 1st International Seminar on the use of aquatic macrophytes for wastewater treatment in constructed wetlands. FCG, Lisboa, V. Dias and J. Vymazal, Lisboa, pp.35-79.

Vymazal, J. (2003). *Removal Mechanisms in Constructed Wetlands*. Proceedings of the 1st International Seminar on the Use of Aquatic Macrophytes for Wastewater Treatment in Constructed Wetlands. FCG, Lisboa, V. Dias and J. Vymazal, Lisboa, pp. 219-263.

Wissing, F.(2003). *The Use of Aquatic Macrophytes For Wastewater Treatment in Constructed Wetlands.* Proceedings of the 1st International Seminar on The Use of aquatic macrophytes for wastewater treatment in constructed wetlands. FCG, Lisboa, V. Dias and J. Vymazal, Lisboa, pp. 421-436.

ANEXO 1

Disposições legais, regulamentares e normativas aplicáveis ao saneamento básico, mais especificamente às águas residuais:

- Directiva 76/464/CEE, de 4 de Maio de 1974, sobre a poluição causada por determinadas substâncias perigosas lançadas no meio aquático;
- Lei de Bases do Ambiente, Lei nº 11/87 de 7 de Abril, que define as bases da política de ambiente, em cumprimento do disposto nos artigos 9.º e 66.º da Constituição da Republica;
- Decreto-Lei nº 446/91, de 22 de Novembro, transpõe para a ordem jurídica nacional a Directiva nº86/278/CEE, do Conselho, de 12 de Junho, relativa à utilização das lamas de depuração na agricultura, de maneira a evitar efeitos nocivos no homem, na água, nos solos, na vegetação e nos animais, promovendo a sua correcta utilização;
- Decreto-Lei nº 45/94, de 22 de Fevereiro, regula o processo de planeamento de recursos hídricos, elaboração, aprovação dos planos de recursos hídricos e institui os Planos de Bacia Hidrográfica, Os Conselhos de Bacia, o Plano Nacional da Água e o Conselho Nacional da Água;
- Decreto-Lei nº 46/94, de 22 de Fevereiro, que estabelece o regime de licenciamento da utilização do domínio hídrico, sob jurisdição do Instituto da Água;
- Decreto-Lei nº 207/94, de 6 de Agosto, estabelece o regime de concepção, instalação e exploração dos sistemas públicos e prediais de distribuição de água e drenagem de águas residuais;
- Decreto Regulamentar nº 23/95, de 23 de Agosto, que aprova o Regulamento Geral dos Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Água e de Drenagem de Águas Residuais;
- Portaria nº 176/96, de 3 de Outubro (2ª série) fixa os valores permitidos para concentração de metais pesados nas lamas utilizadas na agricultura;
- Decreto-Lei nº 152/97, de 19 de Junho, transpõe para o direito interno a Directiva nº 91/271/CEE, do Conselho, de 21 de Maio de 1991, relativamente ao tratamento de águas residuais urbanas;
- Decreto-Lei nº 166/97, de 2 de Julho, aprova a estrutura, competências e funcionamento do Conselho Nacional da Água e altera os artigos 9º e 10º do Decreto- Lei nº 45/94 de 22 de Fevereiro;
- Decreto-Lei nº 236/98, de 1 de Agosto, estabelece normas, critérios e objectivos de qualidade com a finalidade de proteger o meio aquático e melhorar a qualidade das águas em função dos seus principais usos;
- Decreto-Lei nº 112/2002, de 17 de Abril, que aprova o Plano Nacional da Água, orientado por objectivos de natureza sectorial e de incidência transversal nas políticas de outros sectores de actividade, centrando-se em questões territoriais relevantes que garantam a existência das gerações vindouras num ambiente de qualidade.

ANEXO 2

INQUÉRITO SOBRE TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS ATRAVÉS DE LEITOS DE MACRÓFITAS

IDENTIFICAÇÃO E LOCALIZAÇÃO

Câmara Municipal de _____

Distrito de _____

Designação do sistema _____

Freguesia _____

Características dominantes do Concelho (urbano, rural, industrial, outros)

Urbano ☐ Industrial ☐

Rural ☐ Outro ☐ _____

IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA

A concepção foi efectuada por:

Câmara Municipal ☐ Empresa ☐ Qual? _____

A construção foi efectuada por:

Câmara Municipal ☐ Empresa ☐ Qual? _____

A zona onde está inserido o sistema é:

Urbana ☐ Rural ☐ Industrial ☐ Outra ☐ _____

CARACTERIZAÇÃO

O sistema foi projectado para quantos habitantes equivalentes? _____

Área (m2) ocupada pelo sistema completo? _____

Quais os tipos de plantas utilizadas? *Typha* ☐ *Phragmite* ☐ Lírio ☐ Junco ☐

Porquê? _____

Forma dos leitos de macrófitas: Quadrados ☐ Rectangulares ☐ Nº de leitos _____

Quais as dimensões dos leitos de macrófitas? _____

Ano de entrada em funcionamento do sistema? _____

Qual o tratamento prévio realizado antes do leito de macrófitas?

Fossa séptica ☐ Tanque Imhoff ☐ Outro ☐ _____

Custo final do sistema? _____

EFLUENTE

Efluentes que o sistema recebe: Domésticos ☐ Industriais ☐ Outros ☐

Existem águas pluviais estão ligadas à rede? Sim ☐ Não ☐

Utilizam o efluente tratado? Sim ☐ Não ☐

De que forma? _____

São efectuadas análises do efluente tratado? Sim ☐ Não ☐

Com que regularidade? Mensal ☐ Trimestral ☐ Semestral ☐ Anual ☐

O efluente tratado cumpre a legislação em vigor? Sim ☐ Não ☐

Qual o destino final do efluente tratado? Rio ☐ Ribeiro ☐ Outro ☐ _____

MANUTENÇÃO E OPERAÇÃO

Qual a manutenção que é efectuada?

Limpeza da grelha de entrada ☐ Desobstrução das tubagens do leito ☐

Corte das plantas ☐ Outra _____

Quantos funcionários estão afectos a este sistema de tratamento? _____

As plantas mantêm-se com aspecto verdejante durante todo o ano? Sim ☐ Não ☐

Qual a utilização que dão às plantas retiradas em excesso e por corte?

Compostagem ☐ Aterro sanitário ☐ Outra ☐ _____

Que tipo de problemas surgem habitualmente?

Colmatação do leito ☐ Ausência de caixas de visita na intersecção dos tubos ☐

Entrada de sólidos no leito ☐ Odores ☐ Insectos ☐

Verificam alterações no funcionamento com a variação do clima? Sim ☐ Não ☐

Quanto tempo demorou o sistema a funcionar em pleno? 6 meses ☐ 1 ano ☐ 2 anos ☐

Quais os custos actuais de manutenção? _____

CONCLUSÃO

Quais as vantagens deste tipo de sistema?

Integração paisagística ☐ Ausência de equipamentos electromecânicos ☐

Custos de manutenção reduzidos ☐ Boa adaptação à variação de caudais ☐

Eficácia ☐ Ausência de odores ☐ Aproveitamento de fossas sépticas/Tanque I. ☐

Quais os inconvenientes?

Pragas ☐ Morte das plantas ☐ Área ocupada ☐

É satisfatório o desempenho do sistema? Sim ☐ Não ☐

Considera este tipo de sistema bom? Sim ☐ Não ☐

Comentários

_____

_____

Importante

Em anexo juntar esquema de funcionamento do sistema e cópias das três ultimas análises efectuadas.

IDENTIFICAÇÃO DE PREENCHIMENTO

Nome: _____

Funções ou cargo: _____

Data de preenchimento: _____

Contacto para esclarecimento: Telefone _____

E-mail _____

Fax _____

Muito obrigada pelo tempo despendido no preenchimento.