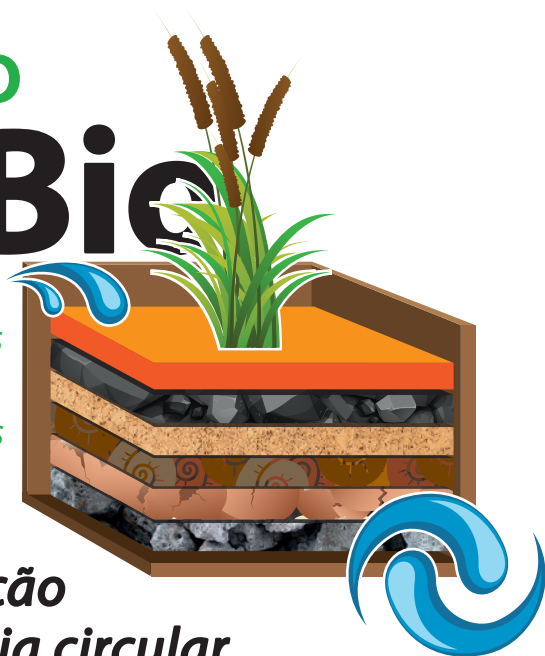


# Projeto ValorBio

*Tratamento de Águas  
Residuais por Zonas  
Húmidas Construídas  
Modulares*



***Uma contribuição  
para a economia circular***

**Coordenação**

Henrique J. O. Pinho e Dina M. R. Mateus



## **Projeto VALORBIO**

### **Tratamento de Águas Residuais por Zonas Húmidas Construídas Modulares**

Uma contribuição para a economia circular



PROGRAMA OPERACIONAL COMPETITIVIDADE E INOVAÇÃO



UNIÃO EUROPEIA

Fundos Europeus Estruturais  
e de Investimento

# Ficha técnica

## Titulo

Projeto VALORBIO

Tratamento de Águas Residuais por Zonas Húmidas  
Construídas Modulares.

Uma contribuição para a economia circular

## Coordenação

Henrique J. O. Pinho

Dina M. R. Mateus

## Edição

Instituto Politécnico de Tomar

## Data

janeiro de 2019

## Design

Gabinete de Comunicação e Imagem - Instituto Politécnico de Tomar

## Impressão

Europress

## ISBN

978-989-8840-27-1

## Tiragem

150



## Agradecimentos

Os autores agradecem a todos os que contribuíram para a redação do presente texto, e também:

Ao Programa FEDER, que cofinanciou os trabalhos experimentais (ref<sup>a</sup> de projeto POCI-01-0145-FEDER-23314 VALORBIO);

Ao Instituto Politécnico de Tomar (IPT) e à sua Presidência, pelo cofinanciamento do projeto e por todo o apoio prestado através da sua estrutura organizacional;

Aos copromotores do projeto: Instituto Politécnico de Coimbra; Instituto Politécnico de Portalegre; Palsar – Bioenergia e Paletes, Lda.;

Aos serviços e colaboradores do IPT, designadamente a todos os colaboradores do Gabinete de Gestão de Projetos, da Direção Financeira e Patrimonial, do Gabinete de Comunicação e Imagem e do Secretariado dos Projetos;

Ao LAB.IPT, particularmente aos Técnicos Alcino Serras, Isabel Silva, Pedro Costa e Vítor Gaspar;

Aos técnicos do Gabinete de Estudos Técnicos e Manutenção do IPT, em particular a Orlando Fonseca e Carlos Ferreira;

A todos os alunos que colaboraram nos trabalhos experimentais, em particular ao Joel Nunes, e à Ana Batista e restantes alunos do Mestrado em Tecnologia Química, à Carolina Masseno, da Universidade Fluminense, Brasil, em mobilidade ao abrigo do programa Santander na Licenciatura em Engenharia Química e Bioquímica, à Marwa Amri, aluna do programa Doutoral em Ciências Geológicas, da Faculté des Sciences de Bizerte, Tunísia, em mobilidade ao abrigo do protocolo de colaboração entre o IPT e a Université Jendouba, e ao André Farinha, Carolina Parra e Luís Santos, do Curso Superior Profissional em Qualidade Ambiental;

Às gerências e colaboradores das empresas que apoiaram os trabalhos, designadamente através da disponibilização de amostras de materiais e de água residual: Alberstone, Unipessoal, Lda.; Amorim Isolamentos, S.A.; Ferreira Gomes & Filhos, Lda.; Pegop – Energia Elétrica, S.A.; Sociedade Lusitana de Destilação, S.A.;

E, por fim, mas não menos importante, à Fundação para a Ciência e a Tecnologia, Autoridade Gestora do projeto VALORBIO.





## Coordenadores/Autores

**Henrique J. O. Pinho**, Professor Adjunto do Instituto Politécnico de Tomar, Doutorado em Engenharia Química, Membro integrado e Coordenador do Centro de Investigação em Cidades Inteligentes, do Instituto Politécnico de Tomar

**Dina M. R. Mateus**, Professora Adjunta do Instituto Politécnico de Tomar, Doutorada em Biotecnologia, Membro integrado do Centro de Tecnologia, Restauro e Valorização das Artes, do Instituto Politécnico de Tomar

## Autores

**Ana M. P. Alves**, Bolseira de Investigação do Instituto Politécnico de Tomar, Mestre em Tecnologia Química

**Eliseu L. M. Monteiro**, Professor Adjunto do Instituto Politécnico de Portalegre, Doutorado em Engenharia Mecânica, Membro integrado do Centro de Investigação para a Valorização de Recursos Endógenos, do Instituto Politécnico de Portalegre

**Isabel M. D. P. Nogueira**, Professora Coordenadora do Instituto Politécnico de Tomar, Doutorada em Engenharia Mecânica, Membro integrado do Centro de Investigação em Cidades Inteligentes, do Instituto Politécnico de Tomar

**Luiz F. F. T. Rodrigues**, Professor Adjunto do Instituto Politécnico de Portalegre, Doutorado em Engenharia Química

**Manuel A. N. Rosa**, Professor Adjunto do Instituto Politécnico de Tomar, Doutorado em Ciências do Ambiente, Membro integrado do Centro de Tecnologia, Restauro e Valorização das Artes, do Instituto Politécnico de Tomar

**Marco A. M. Cartaxo**, Professor Adjunto do Instituto Politécnico de Tomar, Doutorado em Química, Membro integrado do Centro de Investigação em Cidades Inteligentes, do Instituto Politécnico de Tomar

**Nuno A. J. Graça**, Bolseiro de Investigação do Instituto Politécnico de Tomar, Mestre em Tecnologia Química

**Paulo J. R. Isabel**, Professor Coordenador do Instituto Politécnico de Coimbra, Doutorado em Química

**Paulo S. D. Brito**, Professor Coordenador com Agregação do Instituto Politécnico de Portalegre, Doutorado em Engenharia Química, Membro integrado e Coordenador do Centro de Investigação para a Valorização de Recursos Endógenos, do Instituto Politécnico de Portalegre

**Valentim M. B. Nunes**, Professor Adjunto do Instituto Politécnico de Tomar, Doutorado em Química, Membro integrado do Centro de Investigação em Cidades Inteligentes, do Instituto Politécnico de Tomar





# Índice

<b>Capítulo 1</b> // Descrição e objetivos do projeto VALORBIO	9
<b>Capítulo 2</b> // Zonas Húmidas Construídas	15
<b>Capítulo 3</b> // Avaliação de resíduos sólidos como enchimento	19
<b>Capítulo 4</b> // Eficiência de tratamento de águas residuais	31
<b>Capítulo 5</b> // Valorização da água tratada	41
<b>Capítulo 6</b> // Valorização da biomassa sólida	49
<b>Capítulo 7</b> // Zonas Húmidas Construídas modulares	59
<b>Capítulo 8</b> // Conclusões e perspetivas para o futuro	65







# Capítulo 1 – Descrição e objetivos do projeto VALORBIO

Henrique J. O. Pinho, Dina M. R. Mateus

O projeto VALORBIO, Valorização de resíduos através de zonas húmidas construídas modulares usadas para tratamento de águas residuais, foi cofinanciando por fundos FEDER (POCI-01-0145-FEDER-23314) e pelos quatro copromotores, tendo os trabalhos de índole prática aplicada sido desenvolvidos com recursos das quatro instituições:

- INSTITUTO POLITÉCNICO DE TOMAR, proponente, através do Laboratório de Bioenergia e Biotecnologia Aplicada (BIOTEC.ipt);
- INSTITUTO POLITÉCNICO DE COIMBRA, copromotor, através do Instituto de Investigação Aplicada (i2A);
- INSTITUTO POLITÉCNICO DE PORTALEGRE, copromotor, através da Coordenação Interdisciplinar Investigação Inovação (C3i);
- PALSER – BIOENERGIA E PALETES, Lda., empresa com sede na Sertã.

O projeto foi desenvolvido durante 18 meses, entre julho de 2017 e janeiro de 2019, e visou o tratamento de águas residuais através de Zonas Húmidas Construídas (ZHCs), que consistem em sistemas biológicos baseados em plantas, também designados por fito-ETARs (Estações de Tratamento de Águas Residuais baseadas em plantas) ou Leitões de Macrófitas (as macrófitas aquáticas são plantas que se desenvolvem em meios alagados), e que serão descritos em pormenor no Capítulo 2.

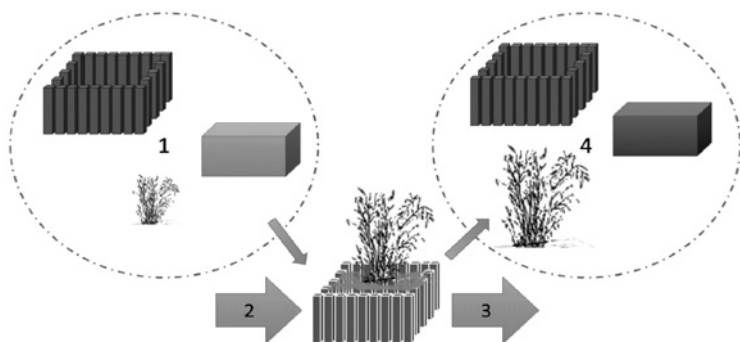
Os principais objetivos, propostos inicialmente e integralmente cumpridos, foram:

- Conceber, construir e testar um sistema de ZHCs modulares, usando materiais da fileira florestal para a estrutura, de modo a aumentar a sustentabilidade das ZHCs, diminuir o seu impacto nos Ecossistemas e permitir valorizar as estruturas quando atingirem o seu fim de vida;
- Testar, como enchimento das ZHCs modulares, materiais residuais e subprodutos gerados na região, como por exemplo fragmentos de rochas e outros materiais usados na construção civil, escórias geradas na queima de carvão nas centrais termoelétricas, desperdícios das atividades das fileiras florestal, agropecuária e agroalimentar, entre outros;



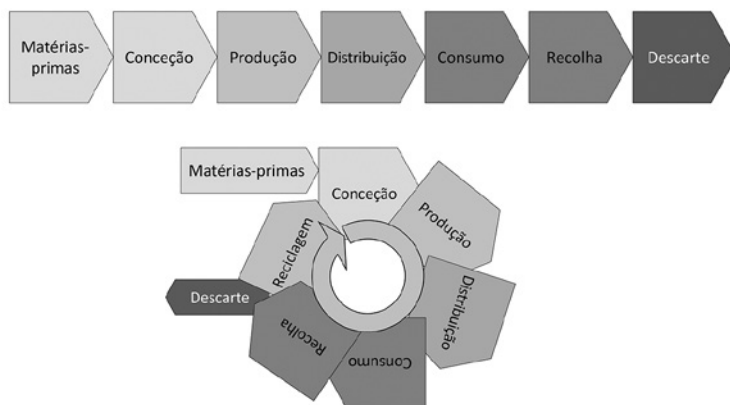
- Avaliar a qualidade das águas após tratamento pelas ZHCs, e definir as condições em que podem ser reaproveitadas ou valorizadas, por exemplo para rega, para lavagem de pavimentos, ou para produção de algas, permitindo reduzir os consumos de água e proteger os recursos hídricos;
- Avaliar a potencialidade e as condições de valorização da biomassa vegetal produzida nas ZHCs (resultante das podas regulares das partes emergentes das macrófitas), designadamente como fonte de energia renovável.

A Figura 1 representa, esquematicamente, a relação entre os principais objetivos do projeto. As ZHCs desenvolvidas no projeto são constituídas por estruturas de madeira, cheias com materiais residuais sólidos e plantadas com macrófitas (1), são usadas para tratar diferentes tipos de águas residuais (2), procedendo-se à avaliação do potencial de valorização da água tratada (3). As podas das plantas (4) foram usadas para avaliar o seu potencial como fonte de energia, e, no futuro, quando as ZHCs atingirem o seu fim de vida, tanto o material de enchimento como as estruturas de madeira poderão ser também valorizadas.



**Figura 1** – Esquema geral dos objetivos do projeto VALORBIO: O significado da numeração está descrito no texto.

O projeto, e os seus objetivos, enquadra-se nos paradigmas da Economia Circular (Figura 2), da Bioeconomia e da Sustentabilidade, e explora e desenvolve o conceito de “Resíduos para Tratar Resíduos”.



*Figura 2 – Paradigma de Economia Circular (esquema em baixo), face à lógica convencional, e não sustentável, de economia linear (esquema em cima).*

A demonstração da funcionalidade das ZHCs modulares, com enchimento de materiais residuais, e a potencialidade de se valorizar a água tratada e a biomassa vegetal produzida, contribui para vários Objetivos de Crescimento Sustentável propostos pela ONU:

- Água potável e saneamento;
- Energias renováveis acessíveis;
- Indústria, inovação e infraestruturas;
- Cidades e comunidades sustentáveis;
- Produção e consumo sustentáveis;
- Ação climática;
- Proteger a vida marítima;
- Proteger a vida terrestre;
- Parcerias para a implementação dos objetivos.

Os resultados obtidos também contribuem para dar resposta a vários Desafios Societais:

- Segurança alimentar, agricultura e silvicultura sustentáveis, investigação marinha e marítima e nas águas interiores, e bioeconomia;



- Energia segura, não poluente e eficiente;
- Ação climática, ambiente, eficiência de recursos e matérias-primas.

e enquadram-se em sete dos Domínios Prioritários de Especialização Inteligente:

- Agro-alimentar;
- Água e ambiente;
- Energia;
- Floresta;
- Materiais e matérias-primas;
- Tecnologias de produção e indústrias de processo;
- Tecnologias de produção e indústrias de produto.

Os trabalhos, de investigação aplicada, envolveram uma equipa alargada de investigadores, constituída por docentes e técnicos dos três Institutos Politécnicos, e pela gerência e colaboradores da empresa, cujo consórcio foi a base do projeto. A participação de vários alunos dos cursos conferentes de grau, e não conferentes de grau, ministrados nos Institutos Politécnicos parceiros, constituiu também um contributo muito importante para a obtenção dos objetivos do projeto.

O projeto consistiu em 10 atividades, descritas de seguida de modo muito sumário:

1. Organização e planificação das tarefas do projeto, para colocar em prática o conjunto de atividades de foro experimental;
2. Estudos preliminares à escala laboratorial, em que se avaliou o potencial de diversos materiais residuais para poderem ser usados como enchimento das ZHCs;
3. Avaliação do desempenho de ZHCs de pequena escala (sub-piloto), para avaliar o desempenho dos materiais selecionados na atividade 2, em termos de contribuição para o tratamento de águas residuais e para o bom desenvolvimento das plantas macrófitas;
4. Conceção e construção de ZHCs modulares, em que a estrutura é construída em madeira;



5. Monitorização do funcionamento de uma ZHC modular, cujo enchimento é constituído por materiais residuais selecionados na atividade 3, em termos da capacidade de tratamento de águas residuais;
6. Monitorização de uma ZHC convencional, para efeitos de comparação com o desempenho da ZHC modular monitorizada na atividade 5;
7. Avaliação da possibilidade de se usar a água residual, após tratada pelas ZHCs, para aplicações como rega, lavagem e cultivo de algas;
8. Avaliação da potencialidade de valorização das partes emergentes (caules e folhas) das macrófitas crescidas nas ZHC, designadamente para produção de energia (bioenergia);
9. Análise de resultados, obtenção de conclusões e proposta de trabalhos futuros;
10. Ações de divulgação do projeto e dos resultados obtidos, que, além do presente trabalho, incluam a organização e participação em *Workshops*, a participação e a publicação de artigos e painéis em Conferências Nacionais e Internacionais.

Os capítulos seguintes incluem uma breve descrição dos trabalhos desenvolvidos nas atividades 2 a 8.





## Capítulo 2 – Zonas Húmidas Construídas

Dina M. R. Mateus, Henrique J. O. Pinho

As Zonas Húmidas Construídas (ZHCs), consistem em sistemas biológicos de tratamento de águas residuais baseados nos mesmos processos naturais que ocorrem nas Zonas Húmidas Naturais, mas de forma controlada e especializada. As ZHCs também costumam ser designadas por ETARs<sup>1</sup> de plantas, fito ETARs ou Leitos de macrófitas, entre outras designações.

O uso de ZHCs tem vindo a generalizar-se, tanto a nível nacional como internacional, tendo começado a ser implementadas por todo o Globo desde há cerca de quatro décadas. Porém, a tecnologia das ZHCs continua a ser objeto de muitos estudos com o objetivo de melhor compreender os complexos mecanismos naturais que são a base do seu funcionamento, e com objetivos relacionados com o incremento da eficiência de tratamento e da melhoria da sua sustentabilidade.

As ZHCs são normalmente utilizadas como sistemas avançados de tratamento, também designados de tratamento terciário, complementando os sistemas primário e secundário tipicamente instalados nas ETARs municipais ou industriais. Em sistemas de tratamento terciário, a sua aplicação tem como principal objetivo remover da água compostos mais resilientes aos tratamentos anteriores, como é o caso de compostos de azoto e de fósforo, e cuja libertação para o ambiente hídrico pode causar fenómenos prejudiciais, como a eutrofização de cursos de água mais sensíveis. Em alguns casos, as ZHCs podem mesmo substituir os sistemas secundários, dependendo das características das águas residuais, como por exemplo em algumas indústrias e em pequenos aglomerados populacionais.

As ZHCs são constituídas essencialmente por três componentes:

- Um leito, ou bacia, que usualmente consiste numa lagoa escavada no solo, mas que também poderá ser um tanque construído acima do nível do solo; o leito é impermeabilizado, usualmente com uma tela geotêxtil, e é dotado de canalizações de entrada e de saída das águas a serem tratadas;
- Um material de enchimento sólido granular, ou mistura de materiais, colocado dentro do leito; o material de enchimento pode ser solo comum, mas é mais usual utilizarem-se materiais como a areia, gravilhas e cascalhos, e mais recentemente, materiais residuais;

---

<sup>1</sup> Estações de Tratamento de Águas Residuais





- Plantas aquáticas, usualmente designadas por macrófitas, que poderão ser flutuantes ou enraizadas no material de enchimento, podendo ser submersas ou emergentes.

A água residual é despoluída pelas ZHCs através de vários mecanismos, complexos e interligados, sendo designadamente os mais importantes:

- A fixação no material de enchimento de substâncias presentes na água, por efeito de combinação de fenómenos físico-químicos, como adsorção, precipitação, mineralização, sedimentação e filtração; estes processos contribuem principalmente para a fixação de compostos inorgânicos dissolvidos ou suspensos na água;
- A assimilação de nutrientes e micronutrientes pelas plantas; as plantas removem diretamente da água, via o seu sistema radicular, compostos de azoto, de fósforo e de potássio, designados por nutrientes, e sais minerais vestigiais, designados por micronutrientes;
- A degradação e assimilação de compostos biodegradáveis pela comunidade microbiana que se desenvolve naturalmente nestes sistemas, em suspensão ou em biofilmes fixados nas raízes das plantas e na superfície do material granular de enchimento.

As ZHCs podem ser de três tipos principais (Figura 3), ou constituírem sistemas híbridos que combinam mais que um tipo, ou que integram outros tipos de tecnologia.

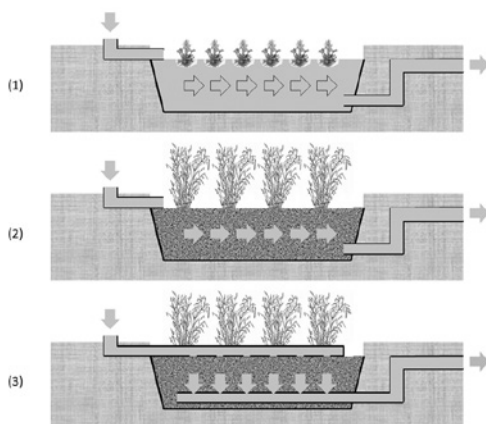


Figura 3 – Esquemas representativos, mas simplificados, dos três principais tipos de ZHC; (1) Escoamento superficial; (2) Escoamento subsuperficial horizontal; (3) Escoamento subsuperficial vertical.

Os três principais tipos de ZHCs são classificados conforme a forma de escoamento da água em tratamento:

- Escoamento superficial (horizontal, em superfície livre); o leito pode conter, ou não, enchimento, mas a maior parte é ocupada pela água; nesta tipologia, usam-se normalmente macrófitas flutuantes, como por exemplo os jacintos-de-água (*Eichhornia crassipes*);
- Escoamento subsuperficial horizontal; o leito contém um enchimento granular, de modo a apresentar a porosidade suficiente para permitir o escoamento da água durante o tratamento; nesta tipologia, usam-se normalmente macrófitas emergentes, como por exemplo os caniços (*Phragmites australis*);
- Escoamento subsuperficial vertical; tratam-se de sistemas semelhantes ao de escoamento subsuperficial vertical, mas, como a designação indica, a água circula verticalmente ao longo do enchimento, do topo para o fundo do leito; nesta tipologia, usam-se igualmente macrófitas emergentes.

As tipologias de escoamento subsuperficial são as mais comumente utilizadas, e entre estas, a de escoamento horizontal. Nestas tipologias, a água residual a tratar não entra em contacto com a atmosfera, o que diminui o risco de libertação de odores e de desenvolvimento de insetos indesejáveis.

As tipologias de escoamento superficial são mais simples, implicam menos custos de instalação e de operação, mas, por outro lado, são em geral menos eficientes no tratamento da água. A utilização de macrófitas flutuantes, neste tipo de ZHCs, pode também representar uma desvantagem, pois existe o risco de as plantas poderem passar para os cursos de água onde se fizer a descarga, e representar um possível impacte ambiental negativo por algumas espécies serem invasivas, como é o caso do jacinto-de-água.

A fotografia da Figura 4 representa uma ZHC de pequena escala, instalada num agregado residencial, do tipo de escoamento subsuperficial horizontal, enchimento de granulado calcário e plantada com caniços.





*Figura 4 – Fotografia de ZHC de tratamento secundário de um pequeno agregado residencial (Em Tomar, Portugal).*

Nos trabalhos desenvolvidos no projeto VALORBIO, foram estudados sistemas à escala laboratorial e piloto, do tipo de escoamento subsuperficial vertical e do tipo de escoamento subsuperficial horizontal.



## Capítulo 3 – Avaliação de resíduos sólidos como enchimento

Nuno A. J. Graça, Ana M. P. Alves, Dina M. R. Mateus,  
Henrique J. O. Pinho, Isabel M. D. P. Nogueira, Marco A. M. Cartaxo,  
Valentim M. B. Nunes

No projeto VALORBIO utilizaram-se ZHCs de escoamento subsuperficial, conforme descrito no Capítulo 2, em que a água sob tratamento flui através de um enchimento de um material residual granular. Neste tipo de ZHCs, o material de enchimento serve como suporte para o crescimento das plantas, mas também permite o desenvolvimento de microrganismos, principalmente na forma de biofilmes na superfície dos materiais. Além da função de suporte, os materiais de enchimento podem contribuir para a remoção de poluentes da água por processos físicos e químicos, tais como filtração, adsorção e precipitação. O uso de resíduos sólidos como materiais de enchimento pode melhorar a sustentabilidade das ZHC e representar um modo de reduzir a deposição dos materiais residuais em aterros sanitários.

A escolha adequada do material de enchimento é relevante para o bom desempenho das ZHCs por:

- Dever garantir o escoamento adequado da água a tratar ao longo da vida útil das ZHCs, de modo a evitar problemas de colmatação;
- Poder potenciar o crescimento das plantas macrófitas e o desenvolvimento de microrganismos que participam nos processos de depuração das águas residuais;
- Poder contribuir ativamente para a remoção dos poluentes através de processos físico-químicos.

O material de enchimento pode representar um dos principais custos de investimento das ZHCs, particularmente quando se usam materiais de preço elevado e quando se implementam sistemas de tratamento de maiores dimensões.

Os materiais usados no enchimento das ZHCs podem ser materiais naturais com pouco processamento, como é o caso de areias, gravilhas, cascalho e conchas, ou serem materiais processados, o que aumenta o seu custo, como é o caso de argilas expandidas e de resíduos sólidos calcinados.



A utilização de resíduos sólidos e subprodutos industriais representa uma alternativa que pode, simultaneamente, baixar os custos de investimento das ZHCs e valorizar os resíduos. Por exemplo, as atividades de extração e processamento da pedra calcária conhecida como vidro de Moleanos, muito usada em Portugal como material decorativo na construção civil, produz quantidades significativas de resíduos todos os anos, que em parte são usados como material de enchimento ou de aterro na construção civil, mas muitas vezes são depositados em aterros.

Além da utilização de resíduos e subprodutos no enchimento das ZHCs representar uma forma de valorização desses materiais, ainda é possível valorizar os materiais minerais após a sua utilização, como seja proceder à sua regeneração e voltar a reutilizar estes materiais nas ZHCs, ou utilizá-los como condicionadores de solos, particularmente quando já estão saturados de nutrientes.

Para além das pedras calcárias, têm sido realizados vários estudos com materiais tão diversos como outras pedras, escórias, cinzas, conchas, carvão ativado, lamas, turfa, algas, casca de arroz, entre outros.

No projeto VALORBIO foram avaliados inicialmente dez resíduos sólidos gerados em atividades industriais situadas na Região Centro, no sentido de avaliar a sua capacidade como material de enchimento de ZHC:

- Fragmentos de tijolo, resultantes da produção de tijolos de argila para construção, partidos ou não-conformes;
- Escórias de carvão, resultantes da queima do carvão em centrais termoelétricas;
- Granulados de cortiça, resultantes das indústrias de processamento da cortiça;
- Cascas de ovo fragmentadas, resultantes de explorações avícolas;
- Bagaço de uva, após extração do álcool nas destilarias de subprodutos vínicos;
- Fragmentos de pedra calcária Moleanos, originado durante a extração e corte de pedras ornamentais e de construção;
- Carços de azeitona, resultantes dos processos de produção de azeite;
- Casca de pinheiro, proveniente de atividades de limpeza florestal;



- Conchas de caracóis, descartadas pelas indústrias de processamento de alimentos e pelas atividades de restauração;
- Aglomerados de madeira (pellets), resultantes de atividades de limpeza florestal e de indústrias de processamento da madeira.

Os estudos de avaliação dos materiais consistiram em quatro tipo de ensaios:

- Caracterização física dos materiais;
- Avaliação do risco de lixiviação de contaminantes para a água;
- Avaliação do potencial de adsorção de poluentes de referência;
- Caracterização física e química.

Foram avaliadas as seguintes propriedades físicas dos dez materiais residuais:

- A massa específica, real;
- A massa específica aparente, em que se considera o volume de vazios entre as partículas, e que reflete a razão massa/volume observada nas ZHCs;
- Os diâmetros observados  $d_{10}$  e  $d_{60}$ , que representam 10% e 60% da distribuição de tamanhos, respetivamente, em termos de massa.

A relação  $d_{60}/d_{10}$  representa o coeficiente de uniformidade, sendo recomendável que seja inferior a 4 para que o risco de colmatação do leito seja mais reduzido. Os resultados obtidos estão presentes na Figura 5. Não foi possível determinar a densidade aparente e a distribuição de tamanho das partículas de casca de ovo fragmentada, por este material ter uma tendência para agregar. O bagaço é um material fibroso, o que não permitiu obter a distribuição de tamanho pelo método utilizado, através de peneiros.



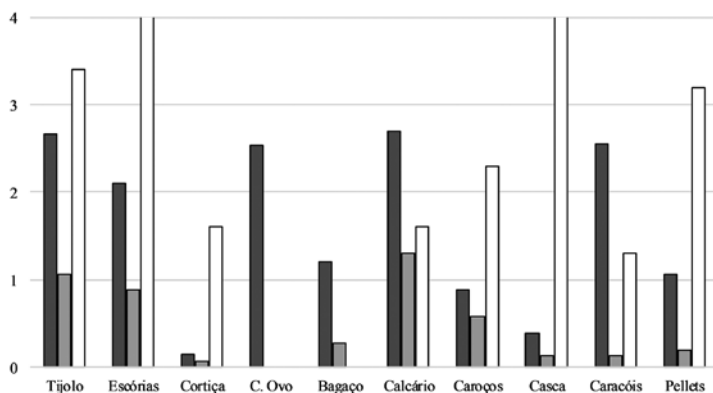


Figura 5 – Propriedades físicas dos materiais residuais estudados: ■ Massa específica real (kg/m³); ■ Massa específica aparente (kg/m³); □ Coeficiente de uniformidade.

A massa específica aparente dos materiais é inferior à massa específica real, o que significa que a porosidade dos leitos construídos com estes materiais é relativamente elevada, o que permite um bom escoamento da água através das ZHCs. Porém, o coeficiente de uniformidade das escórias de carvão e das cascas de ovo fragmentadas é superior a 4, o que indicia que estes materiais poderão causar colmatção das ZHCs.

Ao se usarem materiais residuais no enchimento de ZHCs, existe o risco de esses materiais libertarem contaminantes para a água, provocando um efeito exatamente oposto ao pretendido. Atendendo a que as ZHCs são tipicamente usadas para diminuir a poluição causada por nutrientes (compostos de fósforo e de azoto), e também para reduzir a concentração de compostos que contribuem para o consumo de oxigénio nas águas, por via do crescimento de espécies aquáticas em quantidades desreguladas, relevou-se a quantificação de três indicadores de poluição agregados:

- O teor de fósforo total (TP), quantificado em mg de fósforo por litro de água, mas que agrega todas os compostos de fósforo presentes na água;
- O teor de azoto total (TN), quantificado em mg de azoto por litro de água, mas que agrega todas os compostos de azoto presentes na água;
- A carência química de oxigénio (CQO), quantificada em mg de oxigénio por litro de água, que representa a quantidade de oxigénio necessária para reagir com todos os compostos oxidáveis presentes na água, e que, em geral, é um bom indicador do grau de contaminação por compostos orgânicos.

Para avaliar o risco de libertação de contaminantes para a água, os ensaios de lixiviação foram realizados à escala laboratorial, colocando-se amostras representativas dos materiais durante algum tempo em contacto com água, procedendo-se posteriormente à análise da fase aquosa e à avaliação dos teores em TP, TN e CQO. Os resultados obtidos estão representados na Figura 6.

Verificou-se que apesar de os materiais testados não libertarem quantidades significativas de compostos de fósforo, os materiais residuais orgânicos (granulados de cortiça, casca de pinheiro, pellets de madeira, caroços de azeitona e bagaço de uva) tendem a libertar quantidades superiores destes compostos, relativamente aos restantes materiais.

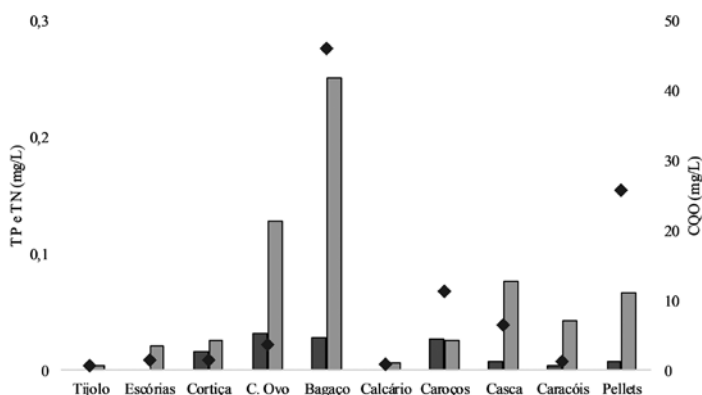


Figura 6 – Resultados dos testes de lixiviação dos materiais: ■ TP libertado para a água (mg/L); ■ TN libertado para a água (mg/L); ◆ CQO libertado para a água (mg/L).

Todos os materiais libertaram para a água pequenas quantidades de compostos de azoto. As cascas de ovo e as pellets de madeira são os materiais que libertam mais quantidades, apesar de serem teores pouco relevantes.

No que respeita à libertação de compostos oxidáveis, em termos da análise de CQO, o bagaço de uva, as pellets de madeira e os caroços de azeitona libertaram quantidades significativas quando em contacto com a água. Apesar de estes três materiais poderem ser aplicáveis em ZHCs, considerou-se após estes ensaios que não são os mais adequados, e não foram usados na continuação dos trabalhos experimentais.

Para avaliar o potencial de adsorção de poluentes pelos restantes sete materiais residuais, foram efetuados ensaios em que se procedeu ao contacto de amostras





representativas dos materiais com alíquotas de uma solução aquosa contendo dihidrogenofosfato de potássio (como fonte de fósforo, TP), nitrato de potássio (como fonte de azoto, TN) e tolueno (para simular a presença de compostos orgânicos, CQO). Após um período adequado de tempo, procedeu-se à análise de amostras da solução em contacto com cada sólido, para observar a eventual diminuição dos teores de TP, TN e CQO. Quanto maior for a diminuição observada, maior é o potencial de remoção de poluentes pelos resíduos sólidos.

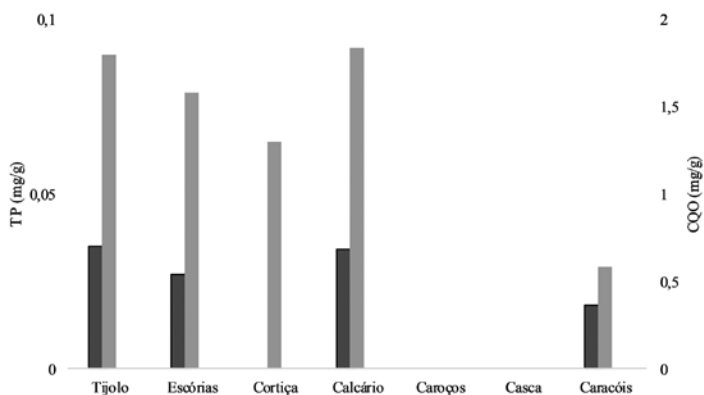


Figura 7 – Resultados dos testes preliminares de adsorção: ■ TP adsorvido (mg/g); ■ CQO adsorvido (mg/g).

Observou-se que nenhum dos materiais tende a adsorver os compostos de azoto (pelas análises de TN), e que nem os caroços de azeitona nem a casca de pinheiro tendem a adsorver compostos de fósforo e compostos oxidáveis (pelas análises de TP e CQO, Figura 7). A partir destes resultados considerou-se que os caroços de azeitona e a casca de pinheiro são menos indicados para enchimento das ZHCs, caso se pretenda que o material de enchimento contribua diretamente para o tratamento da água. Mas, não deixam de poder ser usados como enchimento de ZHCs, visto que também não tendem a libertar contaminantes para a água, e representa uma forma de valorizar estes materiais.

Os cinco materiais remanescentes, por terem revelado melhores propriedades para uso como enchimento em ZHCs, foram utilizados para a realização de testes de adsorção mais completos, determinando-se as isotérmicas de adsorção, em que se avalia a capacidade de retenção de poluentes em função da concentração destes na água. De modo a atingir esse objetivo, foram colocadas amostras dos materiais em contacto, separadamente, com um conjunto de so-

luções aquosas de diferentes concentrações em dihidrogenofosfato de potássio e em tolueno, agitadas durante 24 horas e a temperatura controlada. Após esse período, a fase líquida foi separada dos sólidos por filtração e analisada para determinar o teor de fósforo total e CQO e determinar a massa de soluto adsorvida. O modelo de Langmuir foi ajustado aos dados experimentais para estimar a capacidade máxima de adsorção dos materiais, para o fósforo como TP (Figura 8) e para compostos orgânicos como CQO. Os máximos de adsorção, estimados pelo modelo da isotérmica de Langmuir estão representados na Figura 9.

Os fragmentos de calcário apresentaram a maior capacidade de adsorção de compostos de fósforo, muito superior à capacidade dos restantes materiais. As escórias de carvão possuem a maior capacidade para adsorver compostos orgânicos, mas pouco superior à capacidade dos fragmentos de tijolo e ao granulado de cortiça. Nenhum dos cinco materiais é simultaneamente capaz de remover eficazmente compostos de fósforo e compostos orgânicos. Os fragmentos de tijolo são, entre os materiais estudados, o material que poderá contribuir de forma mais equilibrada para a remoção simultânea de compostos de fósforo e compostos orgânicos presentes na água.

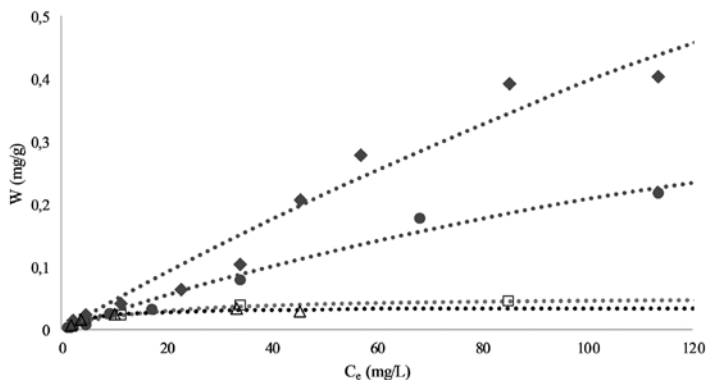


Figura 8 – Exemplo de ajuste da isotérmica de Langmuir aos resultados de adsorção de compostos de fósforo pelos materiais: ◆ calcário de Moleanos; ● fragmentos de tijolo; □ escórias de carvão; △ conchas de caracol.<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Figura reproduzida de D. Mateus, H. Pinho, Screening of solid waste as filler material for Constructed Wetlands, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 182, 012001.

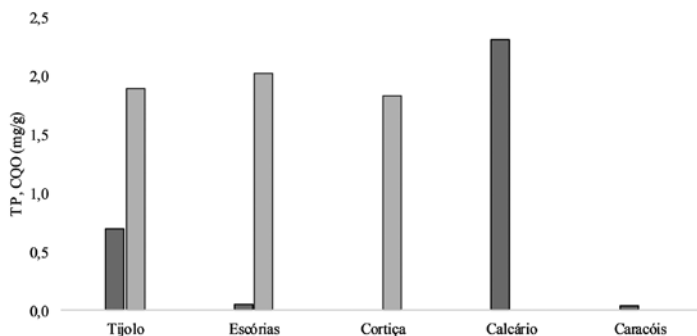


Figura 9 – Estimativa da capacidade máxima de adsorção de compostos de fósforo (com base na análise de TP) e de compostos orgânicos (com base na análise de CQO), através da isotérmica de Langmuir: ■ TP; ■ CQO.

De modo a proceder a uma melhor caracterização dos materiais utilizados, foram ainda analisados os espectros de Microfluorescência de Raios X ( $\mu$ FRX) e de Espectroscopia de Infravermelho (FTIR-ATR), bem como observação microscópica petrográfica e estereoscópica, antes e após a utilização dos materiais nas ZHC (Figuras 10 a 13).

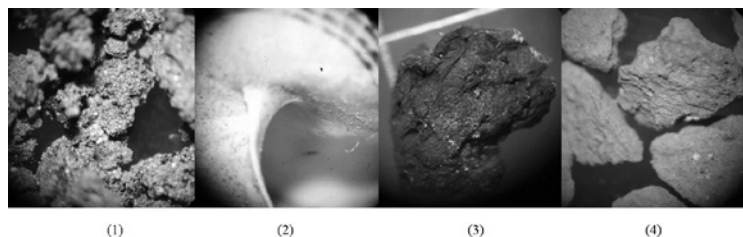


Figura 10 – Observações dos materiais em microscópio estereoscópico, após 11 meses de utilização nas ZHCs, com ampliação de 20x: (1) escórias de carvão; (2) conchas de caracol; (3) granulado de cortiça; (4) fragmentos de tijolo.

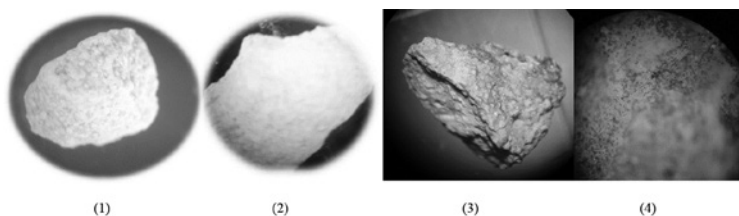


Figura 11 – Observações do calcário em microscópio petrográfico (1 e 2) e em microscópio estereoscópico (3 e 4), antes e após 4 e 11 meses de utilização nas ZHCs: (1) antes de utilizado, ampliação de 20×; (2) após 4 meses de utilização, ampliação de 20×; (3) após 11 meses de utilização, ampliação de 20×; (4) após 11 meses de utilização, ampliação de 100×.

As observações microscópicas não revelaram alterações significativas após quatro e onze meses de utilização para a maioria dos materiais (Figura 10), com exceção do calcário, que exhibe uma evidente formação de biofilmes (Figura 11), os quais não foram observados após quatro meses de utilização.

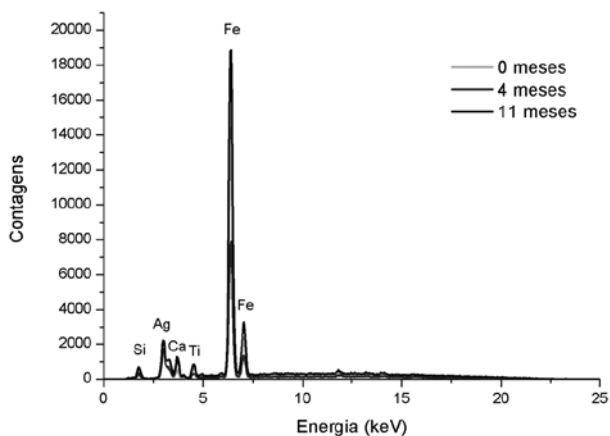


Figura 12 – Espectro de  $\mu$ FRX das escórias de carvão, antes e após 4 e 11 meses de utilização nas ZHCs.



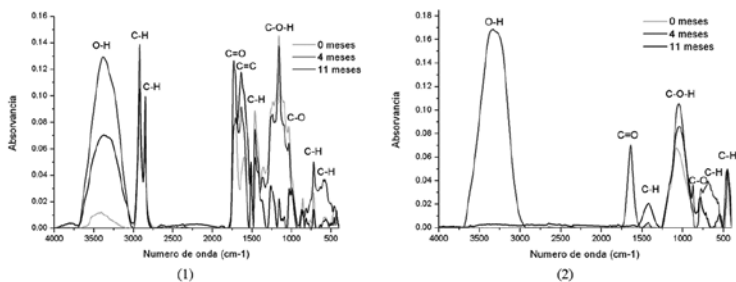


Figura 13 – Espectro FTIR-ATR dos granulados de cortiça (1) e das escórias de carvão (2), antes e após 4 e 11 meses de utilização nas ZHCs.

Os espectros de  $\mu$ FRX não revelaram alterações significativas após quatro e onze meses de utilização (Figura 12), pois não foram detetados picos adicionais em relação ao material antes de utilização nas ZHC: apenas ocorreram algumas alterações na intensidade dos picos observados. De referir que os picos atribuídos ao Si, Ag, Ca e Fe foram observados no espectro obtido com o material utilizado como suporte das amostras, uma placa de vidro, e que o material de ânodo da ampola utilizada é a prata.

Já nos espectros FTIR<sup>3,4</sup> (Figura 13), tanto os granulados de cortiça como as escórias de carvão revelaram adsorção de água, após quatro meses de utilização, associada à banda muito intensa a cerca de  $3300\text{ cm}^{-1}$ . Após onze meses de utilização, observou-se uma redução significativa desta banda no caso dos granulados de cortiça, e uma redução muito pronunciada no caso das escórias. A banda atribuída ao grupo carbonilo a cerca de  $1700\text{ cm}^{-1}$ , que surge após quatro meses de utilização das escórias, quase que desaparece ao fim de onze meses, surgindo aí uma banda atribuída a grupos alifáticos, a cerca de  $1400\text{ cm}^{-1}$ . Para números de onda inferiores, observa-se a presença de grupos alifáticos e grupos C-O, para além das espécies originalmente presentes. Para os granulados de cortiça, os espectros são um pouco mais complexos, devido à natureza do material, mas pode-se constatar que após quatro meses de utilização não ocorrem alterações significativas, exceto na zona dos  $500\text{-}750\text{ cm}^{-1}$ , onde parece haver um aumento da presença de grupos alifáticos. Já após onze meses de utilização, verifica-se

<sup>3</sup> H. Garcia, R. Ferreira, M. Petkovic, J. L. Ferguson, Maria C. Leitão, H. Q. Nimal Gunaratne, K. R. Seddon, L. P. N. Rebelo, C. S. Pereira, Dissolution of cork biopolymers in biocompatible ionic liquids, *Green Chemistry*, 2010, 12, 367–369.

<sup>4</sup> P. Martín-Ramos, I. A. Fernández-Coppel, N. M. Ruíz-Potosme, J. Martín-Gil, Potential of ATR-FTIR Spectroscopy for the Classification of Natural Resins, *BEMS Reports*, 2018; 4(1), 03-06.

uma redução generalizada das bandas atribuídas aos grupos alifáticos, bem como aos grupos C=O, C-O e C-O-H, e ao aumento da intensidade da banda a cerca de  $1700\text{ cm}^{-1}$ , atribuída a grupos alceno. Tais resultados sugerem a formação de diferentes compostos orgânicos, à superfície de ambos os materiais, e ao longo do tempo. Os restantes materiais não revelaram alterações significativas após quatro e onze meses de utilização.

Em resumo, os fragmentos de calcário, os fragmentos de tijolo, as escórias de carvão, as conchas de caracóis e os granulados de cortiça apresentaram potencial para serem utilizados como material de enchimento de ZHC. Estes cinco materiais possuem propriedades físicas adequadas e alguma capacidade de adsorção de compostos orgânicos e de fósforo das águas residuais. Por outro lado, os restantes materiais testados não demonstraram potencial suficiente, seja por terem capacidades de adsorção muito baixas, por lixiviarem compostos em contato com a água, ou por terem propriedades físicas menos adequadas.

Embora os cinco materiais selecionados não tenham apresentado uma capacidade significativa para remover compostos azotados, os resultados obtidos justificaram a realização de testes adicionais em ZHC à escala laboratorial, visto que a remoção de compostos de azoto poderá ser realizada por assimilação das plantas e pela atividade microbiana.

O facto de nenhum dos materiais contribuir de forma satisfatória para a remoção simultânea de compostos de fósforo e de compostos orgânicos, conduziu à decisão de se utilizar misturas de materiais nos ensaios de tratamento de águas residuais, descritos no Capítulo seguinte.





## Capítulo 4 – Eficiência de tratamento de águas residuais

Ana M. P. Alves, Nuno A. J. Graça, Dina M. R. Mateus, Henrique J. O. Pinho

A utilização das ZHCs no tratamento terciário de águas residuais, tem como principal objetivo a remoção de nutrientes (compostos de fósforo e azoto) prejudiciais ao equilíbrio dos meios recetores mais sensíveis, onde provocam efeitos como a eutrofização. No entanto, também são eficazes na remoção de outros tipos de poluentes, em áreas industriais diversas, tais como as águas residuais geradas nas indústrias petroquímica, em matadouros, indústrias de processamento de carnes, de laticínios e de pasta e papel, efluentes de indústrias têxteis e vitivinícolas, bem como no tratamento de águas de recirculação de aquacultura. As aplicações mais recentes incluem a sua utilização no tratamento de efluentes da indústria cervejira, curtumes e lagares de azeite<sup>5</sup>.

Apesar da aplicação das ZHCs ser já significativa, o conhecimento desta tecnologia necessita ainda de otimização, nomeadamente no sentido da realização de estudos que permitam a intensificação do processo. A necessidade de elevadas áreas de implementação para se conseguir tratar os caudais gerados de águas residuais e cumprir os limites legais de descarga é, aliás, a principal desvantagem apontada a esta tecnologia de tratamento.

Na Região centro existe um número significativo de indústrias e fabricantes que contribuem de modo relevante para o crescimento económico local e mesmo nacional, como sejam empresas vinícolas, destilarias, indústrias de curtumes, transformadores de produtos lácteos, empresas de processamento de carnes, lagares e empresas de pasta e papel. As águas residuais geradas por estas atividades geralmente contêm concentrações elevadas de matéria orgânica (mas que pode ser difícil de degradar biologicamente), nutrientes ou mesmo metais. As empresas emissoras desses efluentes líquidos possuem, em geral, sistemas de tratamento preliminar, ou mesmo completo, mas esses sistemas nem sempre conseguem atingir os níveis de tratamento adequados. Os sistemas implementados são usualmente baseados em processos físicos, químicos e biológicos, mas do tipo convencional, que geralmente são dispendiosos e geram quantidades significativa de lamas de depuração. Mas, mesmo com esses sistemas, os

---

<sup>5</sup> J. Vymazal, Constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters: A review, *Ecological Engineering*, 2014, 73, 724-751.





efluentes de tratamentos convencionais podem conter ainda poluentes mais persistentes e não cumprir os requisitos legais de descarga nos corpos de água, necessitando de ser encaminhados para as ETARs municipais, representando não só um encargo financeiro para as indústrias, mas também uma sobrecarga para as referidas ETARs.

Os materiais residuais selecionados após os estudos de avaliação do seu potencial (Capítulo 3), foram aplicados na construção de ZHCs à escala laboratorial e à escala piloto. Nos ensaios à escala laboratorial, foi avaliada a utilização de misturas dos cinco materiais selecionados anteriormente, como enchimento de ZHCs com cerca de 0,12 m<sup>2</sup> de área de tratamento. Deste modo, procedeu-se à combinação das suas diferentes capacidades de adsorção para diferentes poluentes e minimizar as possíveis desvantagens de alguns deles como materiais de enchimento. Nos ensaios à escala piloto reduziu-se o número de materiais para três, usando-se uma mistura destes como enchimento de uma ZHC com 1,2 m<sup>2</sup> de área de tratamento.

As ZHCs de pequena escala e a ZHC piloto foram usadas para tratar água residual do tipo secundário, como referência, e duas águas residuais industriais, geradas na destilação de subprodutos vínicos e pela indústria alimentar.

As ZHCs de escala laboratorial consistiram em cinco conjuntos de duplicados, construídos pela adaptação de vasos de plástico opaco, com o formato de cone truncado, com 35,0 cm, 31,5 cm e 39,0 cm de altura, diâmetro inferior e diâmetro superior, respetivamente (Figura 14).



Figura 14 – Fotografias dos vasos usados para a construção das ZHCs laboratoriais (1), e pormenor do sistema interno de drenagem (2).

Num conjunto, considerado para efeitos de referência, o enchimento foi constituído apenas por fragmentos de calcário, que em trabalhos anteriores demonstrou ser um substrato adequado para as ZHCs<sup>6</sup>. Os restantes quatro conjuntos foram preenchidos com três camadas: uma camada inferior e uma camada superior de fragmentos de calcário, ambas com 7 cm de altura; e uma camada intermédia de 15 cm, de cada um dos outros resíduos avaliados. A Figura 15 representa o esquema da estratificação e uma fotografia representativa das diferentes camadas.

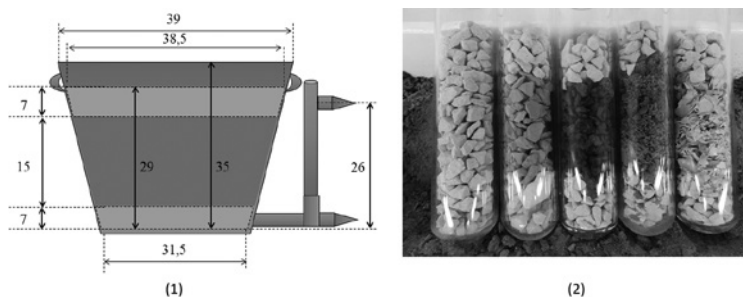


Figura 15 – Esquema da estratificação e das dimensões das ZHCs laboratoriais (1), e fotografia representativa das diferentes camadas (2), da esquerda para a direita, camada intermédia e identificação usada nas ZHCs: fragmentos de pedra calcária (LO), fragmentos de tijolo (LBF), granulados de cortiça (LCG), escórias de carvão (LCS), conchas de caracol (LSS).

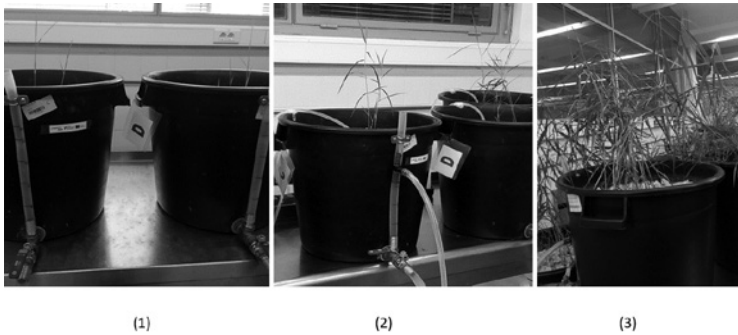
A combinação de diferentes materiais teve como objetivo potenciar a remoção de compostos orgânicos e de azoto das águas residuais, sendo que a pedra calcária de Moleanos possui uma capacidade elevada de adsorção de compostos de fósforo. As ZHCs foram todas plantadas com o caniço *Phragmites australis*, planta macrófita muito resistente a condições adversas e que contribui para a assimilação de poluentes e para o estabelecimento de comunidades microbianas nas suas raízes. O nível de água residual foi mantido abaixo da superfície de contacto com o ar, tendo sido experimentadas duas condições de operação:

- Nível de líquido apenas 2,6 cm abaixo da superfície, a que corresponde uma taxa de inundação (TI) de 89%, e que consiste num valor usual de operação;
- Nível de líquido 12 cm abaixo da superfície, que corresponde a uma taxa de inundação de 54%, tendo como objetivo aumentar o grau de oxigenação do sistema durante o funcionamento em contínuo.

<sup>6</sup> D. Mateus, M. Vaz, H. Pinho, Fragmented limestone wastes as a constructed wetland substrate for phosphorus removal, 2012, Ecological Engineering, 41, 65-69.



Estas pequenas ZHCs foram colocadas no interior, num laboratório bem arejado e iluminado. Na Figura 16 apresentam-se fotografias da evolução do crescimento das plantas ao longo do tempo de operação das ZHCs.



*Figura 16 – Fotografias das ZHCs de escala laboratorial durante o período de experimentação: cerca de 1 mês (1), cerca de 2 meses (2) e cerca de 10 meses (3), após a plantação.*

Nos ensaios utilizou-se água do tipo urbano, após tratamento secundário, e efluente proveniente da destilação de subprodutos vínicos. Para determinar a eficiência de tratamento procedeu-se à análise de amostras da água à entrada e à saída das ZHCs, tendo-se avaliado diversos parâmetros, como sejam a temperatura, o pH, o teor de oxigénio dissolvido e a condutividade, e, particularmente, os principais indicadores de poluição das águas, como sejam a carência química de oxigénio (CQO), a carência bioquímica de oxigénio, (CBO<sub>5</sub>), o teor de fósforo total (TP), o teor de azoto total (TN), o teor de sólidos totais suspensos (TSS) e o índice de cor.

Numa primeira fase procedeu-se ao estudo do efeito de parâmetros operatórios, nomeadamente o modo de operação (contínuo e descontínuo), a carga orgânica e a carga hidráulica<sup>7</sup>, o tempo de residência e o grau de inundação dos leitos. No caso dos efluentes industriais, estudou-se também o efeito da correção da razão C:N:P, nomeadamente através da adição de glucose, como fonte de carbono facilmente biodegradável.

Da análise dos resultados obtidos concluiu-se que a nível global, todas as combinações de materiais conduziram a boas taxas de remoção de contaminantes,

---

<sup>7</sup> A carga hidráulica representa o volume de água a dividir pela área da ZHC e pelo tempo, no caso de funcionamento descontínuo, ou o caudal de alimentação a dividir pela área, no caso do funcionamento contínuo.



destacando-se pela positiva o conjunto cuja camada intermédia é constituída por escórias de carvão. Os resultados menos satisfatórios foram obtidos para as ZHCs cuja camada intermédia é constituída por conchas de caracol. Na Figura 17 apresenta-se como exemplo, um estudo comparativo dos resultados obtidos para o funcionamento em contínuo e em descontínuo, com a carga hidráulica de 0,056 m/dia, e com dois níveis diferentes de inundação das ZHCs.

Com base nos resultados obtidos, construiu-se um novo conjunto de ZHCs em que se usou simultaneamente três dos materiais mais promissores, em termos de desempenho e de reutilização de resíduos, usando como enchimento a combinação de fragmentos de pedra calcária, escórias de carvão e granulados de cortiça. As ZHCs foram preenchidas em camadas, sendo a inferior de 4 cm de fragmentos de pedra calcária, uma primeira camada intermédia de 5 cm de escórias, uma segunda camada intermédia de 15 cm de granulados de cortiça, e por último, uma camada superior de 5 cm de fragmentos de pedra calcária.

Procedeu-se igualmente à realização de ensaios com efluente tipo urbano e com efluentes industriais, que neste caso consistiram em efluentes de destilação de subprodutos vínicos e efluentes da indústria alimentar.



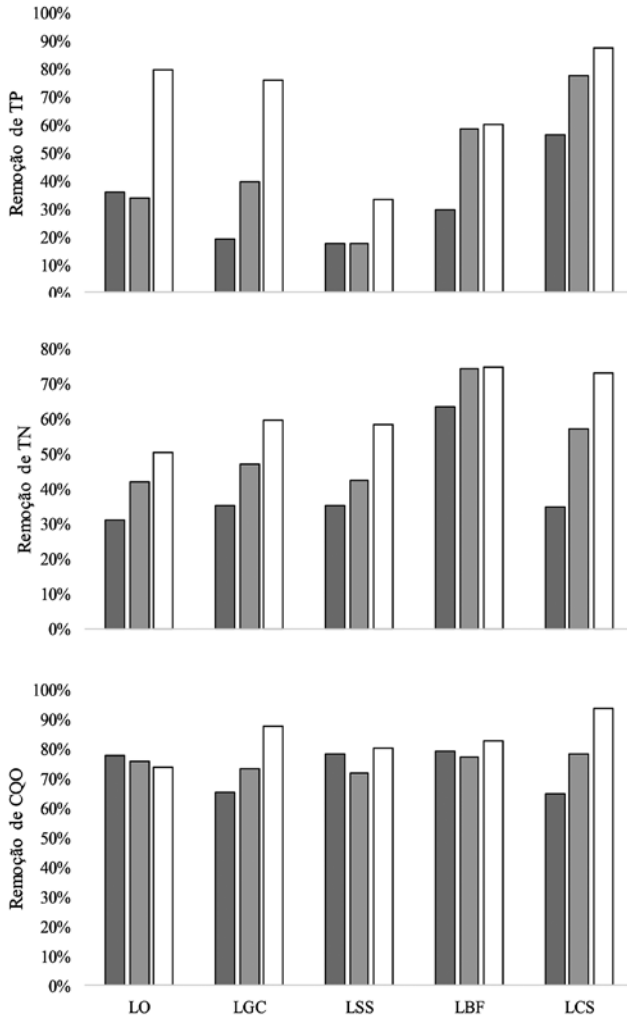


Figura 17 – Eficiências de remoção de TP, TN e de CQO pelas ZHCs de escala laboratorial, para funcionamento em descontínuo e em contínuo com duas taxas de inundação (TI) à carga hidráulica de 0,056 m/dia: ■ Operação contínua, TI = 89%; ▒ Operação contínua, TI = 54%; □ Operação descontínua, TI = 89%.

Identificação das ZHCs: fragmentos de pedra calcária (LO); granulado de cortiça (LGC); conchas de caracol (LSS); fragmentos de tijolo (LBF); escórias de carvão (LCS).



O escoamento adequado da água a tratar nestes sistemas é também um parâmetro importante no seu desempenho. Assim, procedeu-se à realização de estudos de hidrodinâmica. As ZHCs podem ser interpretadas como reatores biológicos e a utilização de traçadores é uma técnica utilizada para o estudo das suas características hidrodinâmicas.

Para as diferentes estratificações de ZHCs, procedeu-se ao estudo do regime de escoamento recorrendo a ensaios com traçadores de cloreto de lítio e de cloreto de sódio. Aplicou-se o modelo TIS (tanques em série) e determinaram-se os respectivos tempos de residência ajustados, que contribuem para melhor entender o desempenho das ZHCs (a Figura 18 representa um exemplo de ajuste).

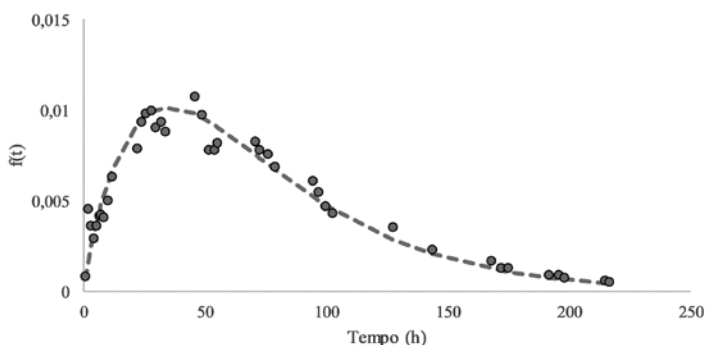


Figura 18 – Exemplo de resultados de um ensaio de traçador para determinação do tempo de residência da água numa das ZHCs de escala laboratorial.

Uma vez otimizadas as melhores condições de operação à escala laboratorial, designadamente o enchimento de materiais residuais, procedeu-se à implementação de uma ZHC à escala piloto, com cerca de 1,2 m<sup>2</sup> de área, cuja conceção será descrita no Capítulo 8. A ZHC piloto foi instalada no exterior, de modo a proceder-se à sua operação em condições reais. A ZHC piloto foi preenchida com fragmentos de pedra calcária, escórias de carvão e granulados de cortiça, mantendo a proporção da altura das camadas utilizada nas ZHCs à escala laboratorial com idêntica estratificação (Figura 19).



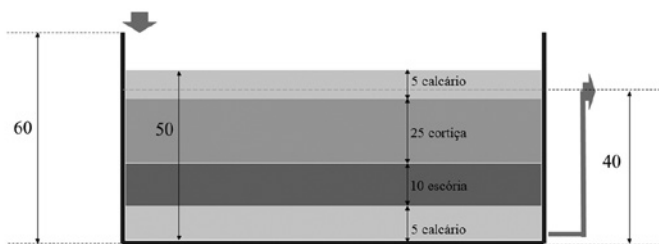


Figura 19 - Esquema da estratificação do enchimento da ZHC à escala piloto (dimensões em cm).

Na ZHC piloto foram realizados ensaios de tratamento de águas residuais em modo contínuo, com efluente do tipo urbano, e em modo descontínuo, quer com efluente do tipo urbano quer com efluente industrial, de destilação de subprodutos vínicos.

Dos valores obtidos nos ensaios realizados com efluente do tipo urbano, foi possível concluir que os ensaios em descontínuo apresentam melhores taxas de remoção comparativamente aos ensaios em contínuo, tal como se verificou nos sistemas laboratoriais. Dependendo do modo de funcionamento e das características do efluente, obtiveram-se taxas de remoção entre 75% e 95% de CQO, entre 40% e 70% de remoção de compostos de fósforo, e entre 55% e 80% de remoção de compostos de azoto, operando a ZHC até uma carga hidráulica de cerca de 150 L/(m<sup>2</sup> dia).

No caso dos ensaios com o efluente industrial, os resultados de uma forma geral foram satisfatórios, obtendo-se taxas de remoção para o funcionamento em descontínuo entre 85% e 90% de CQO, entre 40% e 60% de remoção de compostos de fósforo, e entre 50% e 60% de remoção de compostos de azoto, operando a ZHC em descontínuo até uma carga hidráulica de cerca de 150 L/(m<sup>2</sup> dia).

Os principais desafios colocados ao tratamento dos efluentes industriais estudados consistiam na elevada concentração dos nutrientes mais persistentes, como os compostos de azoto e de fósforo, e também na presença de substâncias com cor. O efluente da destilação de subprodutos vínicos apresentava valores de fósforo total e azoto total relativamente elevados, o que resulta em rácios C:N:P pouco favoráveis, de cerca de 41:37:1, e uma baixa biodegradabilidade. O efluente da indústria alimentar apresentava teores de fósforo elevados, e

uma razão C:N:P de cerca de 17:1:5. Os valores recomendados para aqueles rácios são entre 100:5:1, para processos de tratamento aeróbios, e 250:5:1, para processos anaeróbios<sup>8</sup>. Nas ZHCs, os fenómenos de depuração biológicos combinam processos aeróbios e processos anaeróbios, pelo que os rácios mais adequados deverão ser intermédios àqueles valores, o que, em qualquer dos casos, não enquadram os rácios observados nas águas residuais objeto de tratamento no presente projeto.

Para avaliar a possibilidade de melhorar a eficiência de tratamento das águas residuais industriais, através do ajuste dos rácios C:N:P, procedeu-se à adição de uma fonte de carbono facilmente biodegradável, o que conduziu efetivamente a eficiências de remoção superiores, contribuindo particularmente para a diminuição dos teores de azoto, e, de modo menos significativo, para a diminuição dos teores de fósforo.

O facto de se terem obtido desempenhos satisfatórios, mesmo em condições pouco propícias, demonstra uma excelente capacidade de adaptação das ZHCs implementadas.

A utilização de ZHCs com diferentes estratificações de materiais residuais, com especial destaque para as construídas com fragmentos de pedra calcária, escórias de carvão e granulado de cortiça, permitiu obter desempenhos elevados na remoção de poluentes das águas residuais, ao mesmo tempo que se valorizam resíduos sólidos, o que contribui de forma efetiva para a sustentabilidade ambiental.

---

<sup>8</sup> Metcalf & Eddy, Inc., Eds. G. Tchobanoglous, H. Stensel, R. Tsuchihashi, F. Burton, Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery, 5th ed., 2014, McGrawHill Education







## Capítulo 5 – Valorização da água tratada

Manuel A. N. Rosa, Paulo J. R. Isabel, Dina M. R. Mateus

Os recursos hídricos são limitados e prevê-se que a sua escassez seja um dos grandes desafios do Sec. XXI, particularmente em regiões de clima árido<sup>9</sup>. O contínuo aumento da população mundial e as alterações climáticas tenderão a amplificar a pressão sobre a disponibilidade de água potável, pelo que urge alterar comportamentos e procurar soluções de sustentabilidade.

O tratamento adequado de águas residuais, com vista à sua posterior reutilização, poderá contribuir para a mitigação deste efeito, consistindo numa alternativa sustentável enquadrada no conceito de economia circular. As águas residuais tratadas podem ser usadas para irrigação de terrenos agrícolas ou de espaços ajardinados, para aquacultura, para culturas hidropónicas, para limpeza de espaços urbanos e industriais, para fins recreativos e manutenção de ecossistemas, e ainda para a reposição de águas subterrâneas. Estima-se que cerca de 20 milhões de hectares de terras agrícolas são já irrigadas por águas residuais tratadas, mas também por águas não tratadas, pelo que existe um elevado potencial para o aproveitamento da água<sup>10</sup>. Refira-se que a sociedade depende muitos recursos materiais e energia no tratamento da água potável, pelo que o não aproveitamento desse investimento representa um duplo desperdício de recursos essenciais.

Este capítulo tem como objetivo descrever, de forma breve, os trabalhos desenvolvidos no projeto VALORBIO para avaliar o potencial de reutilização de água residual, depois de tratada pelas ZHCs, através de três estudos experimentais:

- Realização de testes de ecotoxicidade, por recurso a bioindicadores;
- Monitorização do crescimento de plantas ornamentais;
- Produção de microalgas.

Os poluentes e substâncias tóxicas introduzidos no meio ambiente são provenientes de duas fontes distintas, as descargas pontuais e as descargas não pon-

---

<sup>9</sup> S. Lavrnić, M. Zapater-Pereyra, M. Mancini, *Water Scarcity and Wastewater Reuse Standards in Southern Europe: Focus on Agriculture, Water, Air, & Soil Pollution*, 2017, 228, 2-12.

<sup>10</sup> B. Jimenez, T. Asano, *Water Reclamation and Reuse around the World*. In: Jimenez, B. and Asano, T., Eds., *Water Reuse: An International Survey of Current Practice, Issues and Needs*, 2008, IWA Publishing



tuais ou difusas. As descargas pontuais têm como fontes de origem descargas de esgotos, efluentes industriais, locais de tratamento de resíduos perigosos e derrames acidentais, sendo assim fáceis de caracterizar em termos de composição, das taxas de libertação e das quantidades libertadas. Nas descargas difusas, ocorre a libertação de poluentes a partir de materiais libertados no solo e dos sedimentos contaminados, da deposição atmosférica, da lixiviação dos solos agrícolas e de zonas urbanas, sendo assim descargas mais difíceis de caracterizar e os seus componentes podem variar na sua toxicidade para o ambiente.

A quantidade assimilada de uma substância (a sua dose) ou a quantidade de uma substância no meio ambiente (a sua concentração ambiental) é proporcional ao seu efeito nocivo num organismo, podendo, em quantidades muito reduzidas, não ter nenhum efeito adverso na vida desse mesmo organismo. A relação entre a dose e o efeito biológico é conhecida como relação dose-efeito e apresenta perfis de efeito acumulado típicos. Note-se que a concentração de uma substância nociva no ambiente pode não se correlacionar da mesma maneira com a dose assimilada para todos os organismos, porque estes não só têm diferentes estratégias nos seus processos biológicos como têm diferentes áreas de contacto com o ambiente, são constituídos por diferentes tipos de tecidos orgânicos, têm diferentes sistemas respiratórios e de alimentação, têm diferentes sistemas radiculares, etc. e, por isso, diferentes organismos podem assimilar do ambiente o mesmo tóxico em doses bastante diferentes e os efeitos produzidos também podem ser bastante diferentes mesmo quando a dose assimilada é equivalente.

As diferentes estratégias de absorção de tóxicos do ambiente e os efeitos que produzem nos organismos podem ser aproveitados para prever os efeitos que determinado tóxico poderá ter no ambiente, se for testado um conjunto de organismos representativo da fauna ou flora local. Estes organismos de teste são designados por bioindicadores. Sujeitando-se os organismos a concentrações crescentes do tóxico, podemos averiguar os efeitos desse tóxico nos organismos testados e depois extrapolar o efeito para o meio ambiente em estudo. Os efeitos podem ser terminais, como a morte de um caracol ou a não germinação de uma espécie vegetal, ou podem ser efeitos menos dramáticos e mais indicativos de início de doença.

No primeiro caso, o objetivo é calcular as concentrações ambientais que provocam o efeito de matar ou inibir a germinação de metade da população tes-



tada e representam-se como LC50 (concentração letal para 50% da população testada) ou IC50 (concentração que inibe a germinação de 50% da população testada), como se pode observar no exemplo prático do gráfico apresentado na Figura 20.

No segundo caso, o objetivo é prever a concentração para a qual os organismos começam a sentir o efeito do tóxico a que foram expostos. Essa concentração situa-se entre a concentração máxima que não produz efeitos observáveis NOEC (*non observable effects concentration*) e a concentração mínima que produz efeitos observáveis LOEC (*lower observable effects concentration*). Estes ensaios são mais difíceis de concretizar e só podem ser feitos com espécies que exibam sensibilidade e comportamentos anormais observáveis quando expostas aos tóxicos como, por exemplo, um caracol que se refugia no fundo de um aquário em vez de procurar a zona superficial de interface onde o teor de oxigénio na água é maior, ou um peixe que nada invertido de “barriga para cima” ou insistentemente choca com o vidro do aquário, ou ainda uma planta cujo crescimento é estatisticamente diferente do crescimento de outra não sujeita ao tóxico.

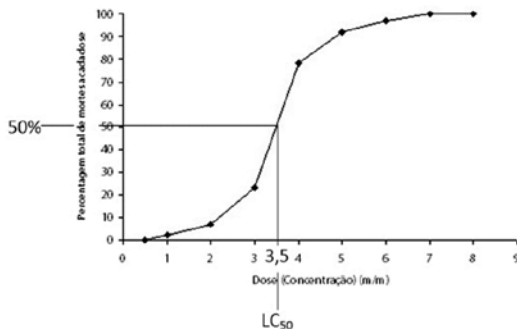


Figura 20 – Distribuição acumulada do efeito obtido (mortalidade) com o aumento da concentração, ou da dose, de uma substância tóxica e o valor do ponto médio LC50 obtido

Neste projeto realizaram-se vários ensaios ecotoxicológicos com sementes de alface da espécie *Lactuca Sativa* para ter uma ideia do impacte que as águas industriais tratadas pelas ZHCs teriam se fossem usadas para rega (Figura 21). Os caracóis da família *Lymnaeidae*, foram o outro bioindicador usado, neste caso para previsão do impacte dos diferentes enchimentos de materiais residuais sobre a qualidade da água tratada, tendo sido realizados testes com as águas



de características iguais aos efluentes urbanos (Figura 22). Os caracóis foram também testados para prever qual a diluição do efluente industrial tratado que produz o mínimo de efeito nos caracóis, especificamente com o enchimento de escórias da queima de carvão.

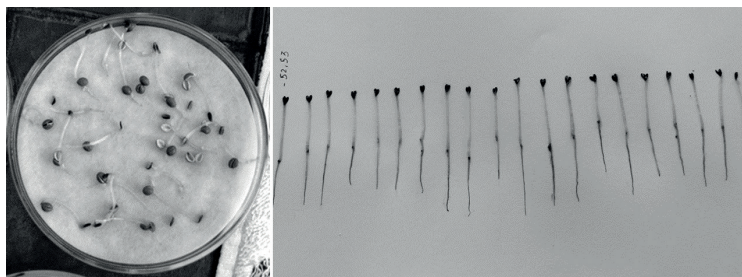


Figura 21 – Ensaio ecotoxicológico: Pormenores de um dos ensaios de inibição da germinação com alface *Lactuca sativa*.

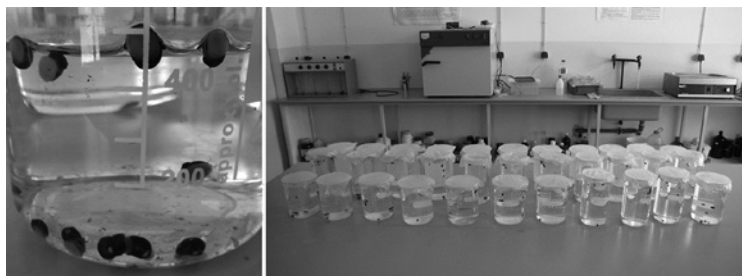


Figura 22 – Ensaio ecotoxicológico: Pormenores de um dos ensaios com caracóis da família *Lymnaeidae*.

No ensaio das sementes testadas com os efluentes industriais, verificou-se que as sementes sujeitas à água tratada com o enchimento de escórias de carvão apresentam o valor de alongação de germinação mais alto e similar ao das germinações de um controlo preparado com água isenta de contaminação. Concluiu-se que a água tratada por este enchimento se apresenta isenta de toxicidade que influencie a germinação e o crescimento das sementes, e, portanto, pode considerar-se apta para ser usada em rega, pelo menos da espécie *Lactuca Sativa*.

No caso das análises ecotoxicológicas realizadas com os caracóis da família *Lymnaeidae* verificou-se que o efluente do tipo urbano tratado com o enchimento de escórias de carvão é o que, ao fim de 28 dias de exposição, menos efeito (mortos) produz. As análises ecotoxicológicas aos caracóis da família *Lymnaeidae* permitiram também concluir que, tanto o efluente industrial não

tratado como o tratado necessitam de uma diluição de pelo menos 1/31 para não impactarem a saúde dos caracóis.

A utilização de águas residuais tratadas para irrigação, particularmente quando esta ainda possui um teor elevado de nutrientes, apresenta três vantagens:

- A reutilização da água;
- A diminuição das descargas nos meios hídricos, o que reduz o risco de eutrofização desses meios;
- A disponibilidade de nutrientes e minerais para o crescimento das plantas, permitindo reduzir o uso de fertilizantes inorgânicos.

Porém, para a água tratada poder ser destinada a irrigação, deve respeitar critérios de qualidade e não conter substâncias tóxicas nem agentes biológicos patogénicos, especialmente no caso de culturas alimentares.

Para avaliar o potencial de irrigação da água residual tratada, utilizou-se a água residual tratada para rega de plantas ornamentais, comparando-se o crescimento das plantas com outras idênticas regadas com água adubada e com água não adubada.

Utilizou-se efluente das ZHCs para a rega de *Tagetes patula L.*, vulgarmente conhecida como Tagetes-anão, cravo-francês, flor-de-estudante, cravo-de-defunto ou cravo-túnico. O cravo-túnico está entre as plantas ornamentais mais utilizadas em jardins de todo o mundo, sendo-lhe também atribuídas propriedades medicinais e efeito repelente de insetos e pragas.

A experiência consistiu na plantação de rebentos previamente germinados para 3 conjuntos de vasos, em duplicado (Figura 23). Um dos conjuntos foi regado com efluente das ZHCs e os outros dois conjuntos foram utilizados como referência. Um dos conjuntos de referência foi regado com água não adubada e o outro com água adubada. O desenvolvimento das plantas foi acompanhado regularmente, registando-se o seu crescimento.





Figura 23 – Conjuntos de vasos para avaliação da adaptação de plantas ornamentais à rega com água residual tratada pelas ZHCs.

Observou-se que as plantas se adaptaram de forma muito positiva à rega com o efluente das ZHCs, apresentando no final deste período um aspeto saudável. Apesar do desenvolvimento das plantas regadas com a água residual tratada ter sido ligeiramente inferior ao das regadas com a água adubada, foi superior ao desenvolvimento das plantas regadas com água não adubada (Figura 24).

Concluiu-se que é possível usar o efluente das ZHCs para o cultivo de plantas ornamentais, sem ser necessário recorrer à aplicação de fertilizantes artificiais. A água reutilizada contém um teor de nutrientes e minerais que foi suficiente para o crescimento das plantas. Deste modo, demonstra-se que é possível evitar a utilização de vários recursos naturais, não só água, mas também compostos minerais de fósforo e de azoto, que são os principais constituintes dos fertilizantes sintéticos. A utilização excessiva de fertilizantes sintéticos na irrigação agrícola é também uma das principais fontes de poluição do meio ambiente, causando fenómenos adversos como é o caso da eutrofização dos cursos de água.



Figura 24 – Comparação dos efeitos da rega, sete semanas após a plantação: (1) irrigação com água não adubada; (2) irrigação com água adubada; (3) irrigação com água residual tratada pelas ZHCs.



A presença de nutrientes e de minerais nas águas residuais tratadas pode também permitir a utilização da água como meio de crescimento de biomassa algal, o que representa uma valorização da água semelhante à rega. As algas são organismos que vivem em meios aquáticos, são capazes de realizar fotossíntese e de se desenvolver utilizando luz do sol e capturando dióxido de carbono atmosférico. As microalgas reproduzem-se muito rapidamente, podendo gerar grandes quantidades de biomassa, incluindo substâncias de valor acrescentado, em pouco tempo. A produtividade pode ser de 10 a 100 vezes superior à produtividade dos cultivos agrícolas tradicionais, o que chamou a atenção de setores industriais que necessitam de grandes quantidades de matéria-prima, como o setor dos biocombustíveis. São já cultivadas muitas espécies de algas, micro ou macro, para a produção de biomassa com muitas e diversas aplicações, como seja a alimentação, humana ou de animais, substâncias farmacêuticas, produtos de cosmética e biocombustíveis. As algas têm a grande vantagem de poderem ser produzidas sem se usar solos agrícolas, e por tal não competirem com a produção de alimentos e de rações, o que muitas vezes é apontado como uma desvantagem, como é o exemplo das culturas agrícolas destinadas à produção de biocombustíveis. Mas, a produção de algas requer o uso de elevadas quantidades de água, podendo assim ser uma desvantagem para a generalização da sua produção. A utilização de águas residuais para o crescimento de algas permite reduzir essa desvantagem, e tornar a produção mais sustentável.

Nas experiências realizadas, utilizou-se efluente das ZHCs para a produção de algas, sem adição de outras substâncias, tais como nutrientes ou sais minerais. Com o objetivo de selecionar as algas mais adequadas e produtivas efetuaram-se cultivos com várias espécies. Foram utilizadas quatro espécies de algas (Figura 25). Utilizou-se, de forma isolada, a microalga *Chlorella sp.* e a macroalga *Cladophora aegagropila* pertencentes à divisão chlorophyta, e uma cianobactéria (*Anabaena sp.*). Efetuaram-se também cultivos com populações mistas de microalgas isoladas das ZHCs, como tal já adaptadas às águas residuais, destacando-se como predominantes as espécies do género *Scenedesmus sp.*

Os cultivos das algas em efluente das ZHCs foram realizados em balão de Erlenmeyer e em reator de coluna de bolhas (Figura 26), com ciclo de luz natural e a diversas temperaturas. Utilizou-se como meio de referência, para comparação, o meio sintético BG11, tipicamente usado para cultivo experimental de algas.





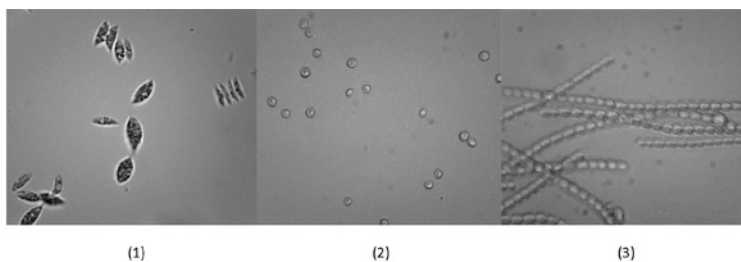


Figura 25 – Fotos das microalgas usadas nos ensaios de crescimento em água residual tratada pelas ZHCs (ampliação de 400× em microscópio ótico): (1) *Scenedesmus* sp. (microalga isolada das ZHCs); (2) *Chlorella* sp.; (3) *Anabaena* sp.

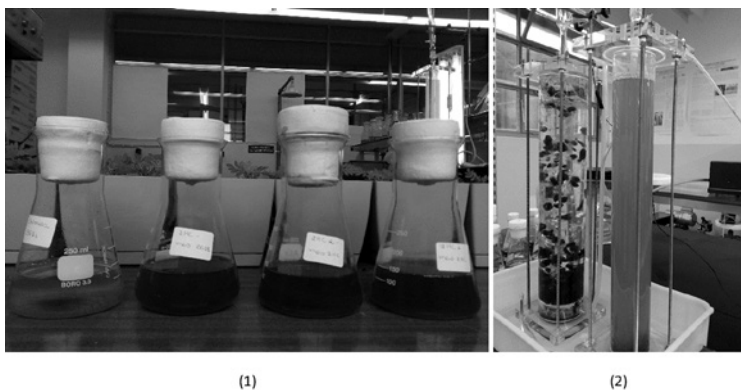


Figura 26 – Exemplos dos cultivos de algas realizados: (1) cultivo de microalgas em balão de Erlenmeyer; (2) cultivo de macroalgas e de microalgas em reatores de coluna de bolhas.

Observou-se que a água residual tratada pelas ZHCs assegurou as condições adequadas para o crescimento das algas estudadas, e, na maioria dos casos, a produtividade obtida foi superior em relação às culturas crescidas no meio sintético. Em geral, as algas produzidas em água residual tratada apresentaram teores mais elevados de pigmentos fotossintéticos (clorofila a e b), de carotenoides, lípidos e de hidratos de carbono. A microalga isolada das ZHCs foi a que apresentou valores de produtividade mais elevados.

## Capítulo 6 – Valorização da biomassa sólida

Luís Calado, Roberta Panizio, Eliseu L. M. Monteiro,  
Luiz F. F. T. Rodrigues, Paulo S. D. Brito

O presente Capítulo descreve o desenvolvimento dos estudos de viabilidade da valorização energética e da produção de biocombustíveis a partir dos resíduos sólidos gerados nas ZHCs, nomeadamente, a biomassa resultante da poda das plantas (*Phragmites australis*) e as estruturas de suporte em madeira (pinho) depois de utilizadas e degradadas, com base em processos de cogaseificação térmica com produção de gás rico em hidrogénio, metano e monóxido de carbono, que pode ser utilizado como combustível (similar ao gás natural) ou ser utilizado como gás de síntese numa biorefinaria.

O crescimento populacional é um fator-chave no que respeita ao aumento do consumo energético, juntamente com a necessidade de desenvolvimento económico e social. Embora os combustíveis fósseis convencionais (carvão, petróleo e gás natural) sejam ainda as principais fontes de energia em todo o mundo, estes não são uma fonte sustentável, especialmente para os países que não possuem reservas abundantes destes combustíveis<sup>11</sup>. A emissão de dióxido de carbono, libertado durante a combustão dos combustíveis fósseis, tem vindo a afetar o ambiente do planeta. No último relatório sobre os impactos do aquecimento global é possível observar que para evitar o aumento de mais que 1,5 °C na temperatura global do planeta, as emissões de dióxido de carbono têm que ser reduzidas praticamente a zero até meado deste século<sup>12</sup>.

Há um interesse crescente em intensificar a produção e o uso de biomassa para substituir os combustíveis fósseis para a produção de calor, de eletricidade e de combustíveis para assegurar uma mobilidade mais sustentável<sup>13</sup>. A biomassa é uma fonte muito promissora, sendo já neste momento a quarta maior fonte de energia na União Europeia com cerca de 63% do *mix* energético, ficando atrás da energia nuclear, de outros tipos de energia renovável e de energia obtida de combustíveis fósseis<sup>14</sup>.

---

<sup>11</sup> M. Mosaddek Hossen, A. H. M. Sazedur Rahman, A. S. Kabir, M. M. Faruque Hasan, S. Ahmed, Systematic assessment of the availability and utilization potential of biomass in Bangladesh, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 67, 94-105.

<sup>12</sup> Global Warming of 1.5 °C, IPCC Special Report (<https://www.ipcc.ch/sr15/>)

<sup>13</sup> M. F. Demirbas, M. Balat, H. Balat, Potential contribution of biomass to the sustainable energy development, *Energy Conversion and Management*, 2009, 50, 1746-1760.

<sup>14</sup> European Biomass Association (AEBIOM), *Bioenergy Europe Report 2017* (<https://bioenergy-europe.org/>)



De entre os processos de conversão de biomassa sólida em energia ou em biocombustíveis, os processos térmicos (combustão, gaseificação, pirólise) apresentam um desempenho muito eficiente para biomassa com baixo teor de humidade e garantem baixas emissões. A gaseificação é um processo de conversão termoquímico que permite uma recuperação eficiente dos recursos de uma ampla gama de tipos de biomassa e de combustíveis derivados de resíduos. Atualmente, esta tecnologia é utilizada em mais de 100 centrais de produção de energia<sup>15</sup>. A biomassa florestal pode ser utilizada nas instalações de gaseificação térmica misturada com outros tipos de combustível, designando-se neste caso por co-gaseificação. A utilização de biomassa florestal tem a vantagem de reduzir as emissões de dióxido de carbono, em comparação com o uso de combustíveis convencionais<sup>16</sup>. Além disso, a biomassa lenhosa, como é o caso dos resíduos florestais, é favorável à co-gaseificação com outros resíduos devido ao seu baixo teor de cinzas, enxofre e azoto<sup>17</sup>.

O processo de gaseificação térmica de biomassa consiste na conversão de um composto orgânico sólido/líquido num composto gasoso e numa fase sólida. A fase gasosa, geralmente chamada de “gás de síntese”, possui um potencial elevado de aquecimento e pode ser usada para a produção de energia ou produção de biocombustíveis. A fase sólida, denominada “*char*” ou “*biochar*”, inclui a fração orgânica não convertida e o material inerte presente na biomassa tratada. Esta conversão representa uma oxidação parcial dos compostos de carbono, que estão presentes em grande quantidade no material de alimentação e geralmente é realizada na presença de um veículo de gaseificação, como ar, oxigénio, vapor de água ou dióxido de carbono. A gaseificação de biomassa é considerada como uma forma de aumentar o uso da biomassa para a produção de energia, permitindo uma utilização generalizada da biomassa.

O gás de gaseificação produzido é uma mistura gasosa de monóxido de carbono (CO), hidrogénio (H<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), bem como hidrocarbonetos leves, como etano e propano, e hidrocarbonetos mais pesados, como

---

<sup>15</sup> N. Tanigaki, K. Manako, M. Osada, Co-gasification of municipal solid waste and material recovery in a large-scale gasification and melting system, *Waste Management*, 2012, 32, 667–675.

<sup>16</sup> C. Cambero, T. Sowlati, Assessment and optimization of forest biomass supply chains from economic, social and environmental perspectives - A review of literature, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 36, 62–73.

<sup>17</sup> J. Shankar Tumuluru, C. Wright, R. Boardman, N. Yancey, S. Sokhansanj, A review on biomass classification and composition, co-firing issues and pretreatment methods, Louisville, Kentucky, August 7 - August 10, 2011, vol. 7004, no. 11, pp. 1–31.



os alcatrões, que condensam a temperaturas entre 250 e 300 °C. Os gases indesejáveis, como o sulfureto de hidrogénio (H<sub>2</sub>S) e o cloreto de hidrogénio (HCl), ou gases inertes, como o azoto (N<sub>2</sub>), também podem estar presentes no gás de síntese, principalmente no que respeita à presença de azoto quando a unidade de gaseificação é alimentada com ar atmosférico. A presença destes gases depende da biomassa tratada e das condições operacionais do processo de gaseificação. O poder calorífico do gás de síntese varia entre 3 e 13 MJ/Nm<sup>3</sup>, dependendo da matéria-prima, da tecnologia de gaseificação e das condições operacionais<sup>18</sup>.

O carvão produzido é uma mistura de fração orgânica não convertida, principalmente carbono e cinzas. A quantidade de fração orgânica não convertida depende principalmente da tecnologia de gaseificação e das condições operacionais. Por outro lado, a quantidade de cinzas depende da biomassa tratada. O poder calorífico inferior (LHV) dos “*biochar*” varia entre 25 a 30 MJ/kg, dependendo da quantidade de fração orgânica não convertida<sup>19</sup>.

As principais reações da gaseificação são endotérmicas e a energia necessária para que ocorram é geralmente cedida pela oxidação de parte da biomassa, através de uma fase alo-térmica ou auto-térmica. No processo auto-térmico, o reator é aquecido internamente através de combustão parcial, enquanto no processo alo-térmico a energia necessária para a gaseificação é fornecida externamente. Considerando o sistema auto-térmico, a gaseificação pode ser vista como uma sequência de vários estágios. A influência da temperatura em todo o processo de gaseificação levou ao desenvolvimento de múltiplas soluções tecnológicas, cada uma caracterizada por uma composição de gás de síntese diferente e uma quantidade diferente de resíduos sólidos. A gama de temperatura típica em que os processos de gaseificação foram desenvolvidos situa-se na ordem de 800-1100 °C, enquanto que nos processos que utilizam oxigénio para a realização da gaseificação, as temperaturas do processo estão na gama de 500-1600 °C<sup>20</sup>.

Existem vários tipos de gaseificadores com diferentes tipos de estrutura. A estrutura dos gaseificadores dependem do tipo de combustível utilizado, a forma como o agente oxidante é introduzido no reator, o tipo de leito onde ocorrem as

---

<sup>18</sup> R. G. Jenkins, Thermal Gasification of Biomass, in Bioenergy - Biomass to Biofuels, 2016, 261–286.

<sup>19</sup> Allesina, S. Pedrazzi, F. Allegretti, N. Morselli, M. Puglia, G. Santunione, P. Tartarini, Gasification of cotton crop residues for combined power and biochar production in Mozambique, Applied Thermal Engineering, 2018, 139, 387–394.

<sup>20</sup> A. Almeida, P. Neto, I. Pereira, A. Ribeiro, R. Pilão, Effect of temperature on the gasification of olive bagasse particles, Journal of the Energy Institute, 2017, *in press*.



reações, e a gama de temperaturas e de pressões utilizadas. Os gaseificadores podem ser divididos em dois grandes grupos: os gaseificadores de leito fixo e os de leito fluidizado.

Nos gaseificadores de leito fixo, a biomassa é introduzida no reator com os gases a fluir entre as partículas. Este tipo de gaseificação possibilita a produção de gás de síntese suficiente para gerar energia elétrica entre as potências de 100 kW e 5 MW. O gaseificador de leito fixo de fluxo de ar descendente (Figura 27), também chamado de “*downdraft gasifier*”, é um reator que apresenta lateralmente a recirculação dos gases quentes produzidos pelo motor, enquanto a biomassa é inserida pela parte superior do equipamento. O ar movimenta-se em sentido descendente, sendo pré-aquecido através do contato com as paredes do reator. A recolha de *chars* é efetuada num depósito próprio, na zona inferior do reator, enquanto o gás de síntese produzido passa através de um ciclone para remoção das partículas finas. O gás é conduzido para o silo de biomassa, de forma a secá-la e é sujeito a uma nova limpeza por meio de um filtro, composto por biomassa de várias granulometrias, podendo a partir de aqui ser recolhido para análise ou ser diretamente injetado no motor de combustão interna. Os condensados são recolhidos na parte inferior do filtro de biomassa.



*Figura 27 – Fotografia de um gaseificador do tipo de leito fixo de fluxo de ar descendente (downdraft), instalado no Instituto Politécnico de Portalegre.*

Os gaseificadores de leito fluidizado têm vantagens em relação aos gaseificadores de leito fixo, sendo exemplo do referido a capacidade de manter a temperatura uniforme no leito. Neste tipo de gaseificadores, o ar é injetado através do leito de partículas sólidas com uma velocidade suficiente para que



estas se mantenham suspensas. Nestas condições, o leito comporta-se como se estivesse em ebulição, apresenta uma excelente uniformidade de temperatura e permite um contato elevado entre o combustível sólido - a biomassa - e o agente oxidante. Normalmente, este tipo de sistema realiza a transferência de calor recorrendo a um leito composto por areia (em muitos casos, carbonato de cálcio, que apresenta algumas especificidades de acordo com o tipo de biomassa, granulometria, caudal mássico e temperaturas de funcionamento). A biomassa, sobe a forma de partículas, é introduzida na base do reator sendo rapidamente misturada com o leito e aquecida quase instantaneamente até à temperatura do mesmo<sup>21</sup>. A Figura 28 representa uma unidade piloto com os seguintes componentes:

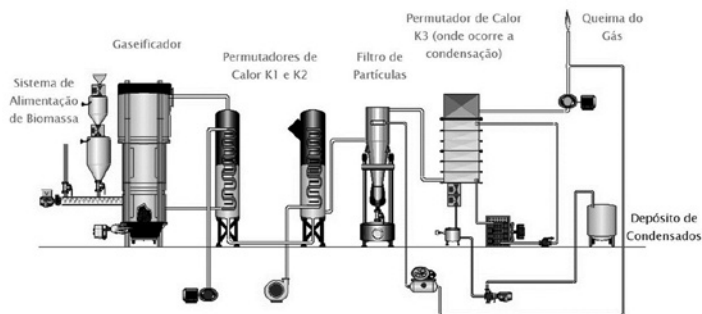
- Sistema de alimentação de biomassa: constituído por silos de armazenagem e parafuso sem fim de velocidade controlável, para descarregar o material no interior do reator a uma taxa da ordem de 50 kg/h; no sentido de garantir que não entra ar no sistema de alimentação de biomassa, são utilizados dois silos de armazenamento munidos de duas válvulas electropneumáticas instaladas em série que abrem e fecham de forma alternada;
- Reator de leito fluidizado: reator tubular com 0,4 m de diâmetro e 2,5 m de altura e revestido com materiais cerâmicos refratários; a biomassa é admitida ao interior do reator a 0,5 m da base do mesmo; o ar, pré-aquecido, entra no reator na sua base através de um conjunto de difusores a um caudal da ordem do 70 m<sup>3</sup>/h; o leito fluidizado é assegurado com a introdução de 70 kg de dolomite (CaCO<sub>3</sub>); estão instalados 3 sensores de temperatura dentro do reator de forma a monitorizar e controlar o processo de gaseificação; o processo é controlado para que a gaseificação ocorra a uma temperatura de 800 °C; no topo do reator a temperatura de saída do gás é de 750 °C; o reator funciona com um gradiente negativo de pressão, produzido com o auxílio de uma bomba de vácuo instalada no fim do processo; o controlo da temperatura do reator, fator determinante no processo de gaseificação, é efetuado com base na quantidade de ar admitida ao reator; assim, o aumento de temperatura do reator implica o aumento do caudal de ar;
- Sistema de arrefecimento do gás: constituído por dois permutadores de calor; o primeiro arrefece o gás de gasificação em co-corrente com o ar que entra na unidade até uma temperatura da ordem dos 300 °C e o segundo permutador arrefece o gás de gaseificação até 150 °C com convecção forçada de ar exterior;

---

<sup>21</sup> T. B. Carvalho, P. S. D. Brito, A. S. Oliveira, Gaseificação térmica de resíduos sólidos da indústria do azeite, 1st International Congress in Bioenergy, p. 6, 2010.



- Filtro de mangas: as partículas de carvão produzidas no processo de gaseificação são removidas num filtro de mangas celulósico; a limpeza do filtro é feita pela injeção de gás de gaseificação a pressão elevada; o carvão é recolhido num depósito;
- Condensador: a remoção dos condensados líquidos é feita por arrefecimento num terceiro permutador de calor em serpentina até à temperatura ambiente.



*Figura 28 – Esquema da unidade piloto de gaseificação térmica de leito fluidizado, instalada no Instituto Politécnico de Portalegre.*

O termo “culturas energéticas” é utilizado para culturas anuais e perenes em terras agrícolas destinadas exclusivamente a fins energéticos. A biomassa vegetal obtida a partir de culturas energéticas pode fornecer a matéria-prima como combustível sólido ou substrato para a produção de gás de síntese. Também pode ser usado como extrato para a produção de combustíveis líquidos. Ao mesmo tempo, o crescimento das plantações de culturas energéticas em Portugal é uma oportunidade para diversificar a produção agrícola e aumentar a rentabilidade da agricultura.. Um elemento importante no desenvolvimento de culturas energéticas é também um aumento na ativação económica das áreas rurais, de acordo com os princípios do desenvolvimento sustentável. Porém, o uso de solos agrícolas para produção de culturas energéticas pode competir com culturas tradicionais destinadas à alimentação humana e à alimentação animal, criando desequilíbrios nos mercados e podendo provocar o aumento de preços.

A utilização de biomassa vegetal produzida nas ZHCs tem a vantagem de não usar solos agrícolas, além de as plantas contribuírem para o tratamento das águas residuais. O uso de vegetação das ZHCs representa também uma econo-

mia do uso de fertilizantes, visto que as plantas obtêm os nutrientes das águas residuais objeto de tratamento. No projeto VALORBIO utilizaram-se caniços (*Phragmites australis*), que consiste numa gramínea alta, fina e muito produtiva, com uma produtividade de até 30 ton/ha ano. Nas ZHCs, e tal como na maioria das áreas e aplicações, os caniços são podados no inverno.

As experiências realizadas visaram explorar o potencial energético dos caniços produzidos nas ZHCs, através da gaseificação. Devido à especificidade deste material combustível e às características de alimentação do reator de gaseificação térmica, foi necessário secar os caniços, e posteriormente, triturar e misturar com estilha de pinho, para obter a densidade adequada à introdução no reator através de um parafuso sem-fim.

Realizaram-se ensaios de caracterização dos caniços e das estilhas de pinho, no que se refere ao teor de humidade, de materiais voláteis e de cinzas. Também se determinou a análise elementar e o poder calorífico. Os resultados foram obtidos com o auxílio de um analisador elementar Flash Thermo CHNS-O 2000, de um equipamento de termogravimetria TGA STA6000 PerkinElmer e de um calorímetro IKA C200.

Os ensaios de gaseificação foram realizados com a unidade de gaseificação Power Pallet 20 à temperatura de 800 °C, usando-se uma mistura de 90% de estilhas de pinho e 10% de caniços, e, para comparação, apenas estilhas de pinho. A unidade de gaseificação ficou a estabilizar durante, pelo menos, 3/4 de hora, tempo ao fim do qual foram retiradas amostras do gás em sacos próprios, para determinação da sua composição num cromatógrafo de fase gasosa da Varian (450-GC), equipado com dois detetores que permite a análise dos seguintes gases:  $H_2$ , CO,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_2H_4$ .





Na tabela 1 estão apresentados os resultados obtidos das análises efetuadas aos dois materiais estudados, nomeadamente, análise elementar, poder calorífico e termogravimetria.

*Tabela 1 – Análise das propriedades das duas biomassas estudadas.*

Parâmetro	Biomassa	
	Pinho	Caniços
Análise elementar (%)		
C	49,70	42,60
H	7,50	6,80
N	0,60	3,40
S	0,00	0,00
O	39,6	39,50
Poder calorífico (MJ)	22,03	18,60
Humidade (%)	7,43	9,70
Voláteis (%)	53,61	52,50
Carbono livre (%)	36,36	30,10
Cinzas (%)	2,6	7,70

Os resultados obtidos permitem verificar que o pinho apresenta um maior poder calorífico, sendo, eventualmente resultado de uma menor humidade e quantidade de cinzas, associado a uma maior quantidade de carbono elementar.

Na tabela 2 estão apresentados os resultados obtidos com os ensaios de gasificação da biomassa, constituída por 100% pinho e pela mistura de 90% pinho e 10% de caniços.



Tabela 2 - Resultados obtidos com os ensaios de gaseificação da biomassa 100% pinho e 90% pinho + 10% caniços.

Parâmetros	Pinho	90% Pinho + 10% Caniços
Operatórios		
Temperatura de Oxidação (°C)	807	812
Temperatura de Redução (°C)	472	433
Pressão Oxidação (mbar)	-3	-2
Pressão Redução (mbar)	-31	-17
Pressão Filtro (mbar)	-78	-67
Consumo Biomassa (kg/h)	2,34	3,6
Produção de Cinzas (kg/h)	0,078	0,143
Produção de Condensados (l/h)	0,26	0,43
Composição do gás (%)		
H <sub>2</sub>	14,45	14,55
CO	12,95	13,50
CH <sub>4</sub>	0,20	0,20
Etano	0,00	0,00
Etileno	0,00	0,00
CO <sub>2</sub>	12,45	14,25
N <sub>2</sub>	59,92	56,30
Poder calorífico (MJ/Nm <sup>3</sup> )	3,27	3,33

O resultado da análise dos gases revela que o gás de síntese produzido, em ambas as gaseificações, contém compostos muito relevantes no que respeita ao conteúdo energético, como o monóxido de carbono (percentagem em massa, entre 13% e 14%) e hidrogénio (15%) sendo, efetivamente, estes dois gases (juntamente com alguns hidrocarbonetos leves, mas presentes em quantidades muito residuais no gás de síntese) os principais responsáveis pelo poder calorífico dos gases produzidos. Os poderes caloríficos dos gases analisados apresentam-se superiores a 3 MJ/Nm<sup>3</sup>, como se pode verificar na tabela 2. Por outro lado, verifica-se que o gás de síntese contém quantidades significativas de azoto (cerca de 60%) e algum dióxido de carbono (entre 13% e 14%) resultante do processo de combustão parcial que tem lugar simultaneamente com a gaseificação da biomassa. Quando comparados os resultados obtidos com as duas biomassas, são evidentes os efeitos benéficos obtidos pela adição dos caniços às estilhas de pinho, apesar de ambos os ensaios terem sido semelhantes em termos de composição de gás de síntese, e conseqüentemente, do poder calorífico (Figura 29). Apesar dos gases com maior poder calorífico, hidrogénio e monóxi-



do de carbono, apresentarem-se nas mesmas concentrações, a mistura ostenta uma concentração inferior de azoto e uma concentração ligeiramente maior de dióxido de carbono. Este resultado pode estar relacionado com a facilidade com que o caniço entra em combustão relativamente ao pinho, não carecendo de tanto ar atmosférico para entrar em combustão, mas gerando mais dióxido de carbono quando este fenómeno acontece.

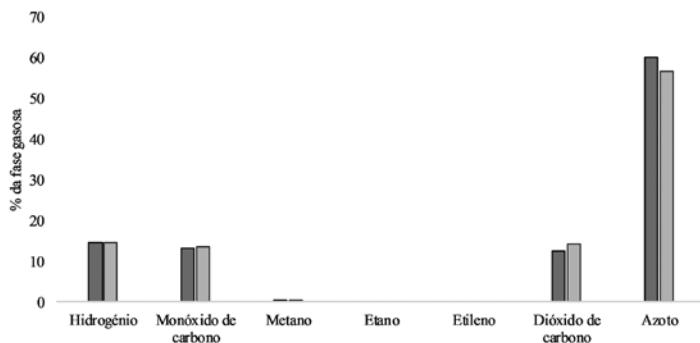


Figura 29 – Comparação da composição das misturas gasosas obtidas na gaseificação de biomassa com 100% pinho (■) e da mistura de 90% pinho e 10% de caniços (▨).

Os resultados evidenciam um efeito positivo de se trabalhar com a temperatura de gaseificação na ordem dos 800 °C. Efetivamente, a esta temperatura, a estabilização do equipamento é muito mais facilitada e a produção de condensados e de carvões revela-se menor do que em testes realizados com temperaturas inferiores. Os carvões resultantes dos ensaios realizados apresentam valores energéticos muito relevantes, superiores a 16 MJ/kg. Seria, portanto, interessante experimentar a gaseificação destes carvões para produção de um gás de síntese com vista a avaliar o seu conteúdo calorífico. O baixo conteúdo de humidade sugere também a possibilidade da combustão direta do carvão para obtenção de energia, sem a aplicação de um tratamento de secagem e o consequente consumo energético adicional, desde que o material seja bem acondicionado durante o seu transporte e armazenamento.

O trabalho desenvolvido demonstrou a viabilidade de se valorizar a biomassa resultante de tratamento de águas residuais por ZHCs, em combinação com resíduos de limpeza de florestas ou com as próprias estruturas de madeira das ZHCs modulares em fim de vida, num gás valioso, rico em hidrogénio e outros produtos muito relevantes em termos de poder calorífico, e ainda com potencial como matéria-prima para a indústria química.

## Capítulo 7 – Zonas Húmidas Construídas modulares

Henrique J. O. Pinho, Dina M. R. Mateus<sup>22</sup>

O principal objetivo do projeto VALORBIO consistiu na conceção, construção e realização de testes de operação, de um protótipo de estrutura modular para ZHCs. A conceção foi efetuada em estreita parceria com a empresa Palser – Bioenergia e Paletes, S.A., copromotor do projeto. A ideia, inovadora, resultou na submissão de um pedido de patente.

Conforme já descrito no Capítulo 2, as ZHCs são normalmente implementadas por recurso a lagoas escavadas no solo, onde se coloca uma tela impermeável e os sistemas de drenagem da água tratada, e, no caso de o escoamento ser do tipo subsuperficial, as lagoas são cheias com um material granular, ou com uma mistura de diferentes materiais, conforme se descreveu nos Capítulos 3 e 4. No caso de ZHCs de menores dimensões, particularmente as utilizadas para o tratamento de águas residuais industriais, e as ZHCs operadas para a realização de testes piloto, é usual utilizarem-se estruturas rígidas, tipo tanques construídos em alvenaria por exemplo. Este tipo de construção é muito limitado a pequenas áreas de trabalho, visto implicar um aumento do investimento associado à sua instalação. As soluções baseadas em lagoas ou em tanques de alvenaria partilham as desvantagens de terem de ficar fixadas no terreno e de ser difícil de proceder a posteriores alterações.

A utilização de sistemas modulares de construção visa ultrapassar as duas desvantagens referidas:

1. As ZHCs modulares não ficam fixas no terreno, e por tal podem ser transferidas para locais diferentes;
2. O sistema de módulos permite modificar, com relativa facilidade, a dimensão dos leitos, tanto em forma como em área de tratamento disponível.

A primeira particularidade dos sistemas modulares permite uma gestão flexível dos espaços, o que pode ser muito relevante em contextos industriais ao representar graus de liberdade na organização do equipamento produtivo.

A segunda particularidade permite adaptar as ZHCs modulares a alterações persistentes nos parâmetros de operação, como sejam o caudal ou a composi-

---

<sup>22</sup> O trabalho descrito neste capítulo contou com a colaboração da Palser – Bioenergia e Paletes, Lda.

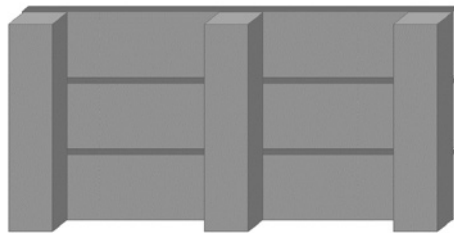


ção da água a tratar, através da intervenção sobre a área disponível ou da modificação da forma dos módulos.

A construção modular das ZHCs apresenta ainda a vantagem de se poderem utilizar diferentes materiais de construção, tais como madeira ou materiais plásticos reciclados, o que contribui para o aumento da sustentabilidade e incremento das vantagens económicas associadas à instalação e operação das ZHCs. Esta particularidade também representa uma via de aumentar a circularidade dos materiais usados na construção de ZHCs.

Caso o material de construção seja madeira, ou materiais de fácil reciclagem, a construção modular apresenta a vantagem de facilitar a recuperação e reciclagem dos materiais, em resultado de o sistema ser de acesso fácil, por ser montado acima do nível do solo. E, por os próprios módulos serem constituídos por componentes, também facilita as tarefas de desmantelamento após o fim de vida das ZHCs.

O sistema de construção modular baseia-se na utilização de componentes estruturais individuais, que podem ser todos iguais entre si ou consistir num número de variantes que visem acrescentar funcionalidades aos módulos, e que ligados entre si permitem construir módulos de dimensão variável e modificável. Na Figura 30 representa-se um exemplo de componente do sistema modular, que pode por exemplo ser produzido em madeira ou em plástico reciclado. As dimensões e o número de travessas horizontais e de barras verticais podem variar, bem como podem ser usadas estruturas geométricas diferentes.



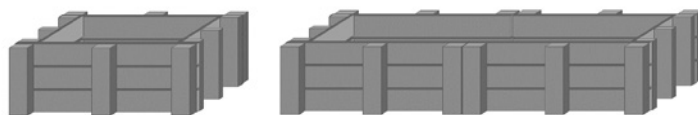
*Figura 30 – Exemplo de componente estrutural individual. O número e a forma das travessas horizontais, o número e a forma das barras verticais, bem como as dimensões relativas, podem ser adaptadas tendo em conta as características dos materiais de construção.*

Os módulos são criados através da ligação de um número apropriado de componentes (Figura 31), obtendo-se a estrutura que serve de suporte à tela imper-



meável, que pode ser rígida ou flexível em função da dimensão dos módulos e das características do material de enchimento. Os componentes, e os módulos obtidos pela sua combinação, não necessitam de ser fechados e estanques, pois essa função é garantida pela tela impermeável.

Os componentes estruturais individuais podem ser desenhados de modo a facilitar o encaixe entre si e a instalação da tela e tubagens de entrada e saída da água nos módulos, ou estes acessórios podem ser independentes. Os componentes estruturais podem ser produzidos em materiais reutilizáveis, como madeira, alumínio ou materiais sintéticos, ou materiais reciclados. De modo a facilitar a transferência dos módulos, a tela pode consistir na forma de sacos dotados de alças ou outro sistema que permita remover e transportar o enchimento.



*Figura 31 – Exemplos de módulos para ZHCs, construídos a partir da união de componentes individuais.*

A união entre os módulos pode ser efetuada através de acessórios de ligação, ou através de encaixes macho-fêmea esculpidos ou moldados nos componentes se o material de construção o permitir.

Através da combinação dos componentes estruturais é possível construir ZHCs de forma e dimensão variável (Figura 32). A dimensão e forma dos módulos de ZHCs pode influenciar a eficiência de tratamento das águas residuais, pois afeta o tempo de residência e as características de escoamento da água através do enchimento granular. A facilidade em se adaptar a forma e a dimensão dos módulos permite encontrar as melhores condições operacionais e aumentar o desempenho do tratamento de água.



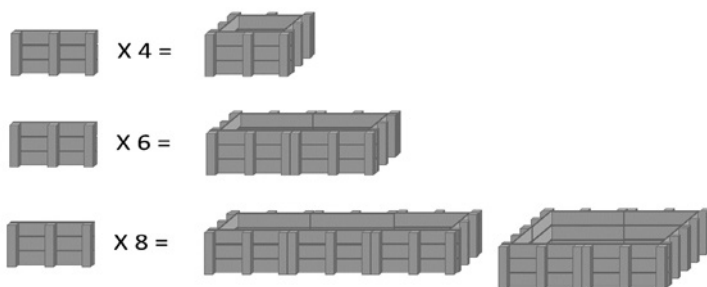


Figura 32 – Exemplos de construção de módulos para ZHCs, construídos a partir da união de componentes individuais, de modo a obter formas e dimensões diversas.

A robustez dos módulos, particularmente no caso de ZHCs de maior dimensão, pode ser assegurada por recurso a simples tirantes ou cabos a interligar os componentes, ou por recurso a sistemas simples de escoramento (Figura 33).

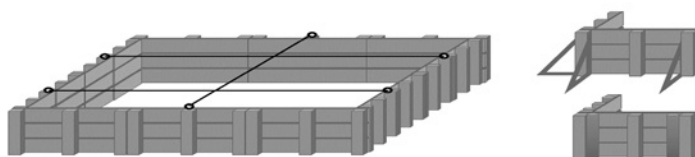


Figura 33 – Exemplos de soluções para reforçar a resistência estrutural dos sistemas de ZHCs modulares construídos através da união de componentes individuais: à esquerda, com recurso a cabos ou tirantes; à direita em cima, com recurso a contrafortes; à direita em baixo, com recurso a estacas.

Uma das vantagens da solução modular consiste na relativa facilidade de por deslocação ou remoção de componentes, ou por adição de novos componentes, ser possível mudar a forma e/ou a dimensão das ZHCs, permitindo a sua adaptação a novos parâmetros de operação, como sejam as alterações na composição ou nos caudais das águas residuais a tratar. Na Figura 34 representa-se um exemplo do processo de modificação da forma ou dimensão, não sendo um exemplo limitativo, visto o número de elementos indicado ser apenas exemplificativo. Por exemplo, a partir de um módulo 2x2 pode-se construir um módulo 1x6 apenas por reorganização dos elementos individuais (Figura 34, em cima), pode-se alterar para um módulo 1x2 por remoção de dois elementos (Figura 34, ao centro), ou pode-se alterar para um módulo 2x3 por adição de mais dois elementos (Figura 34, em baixo).

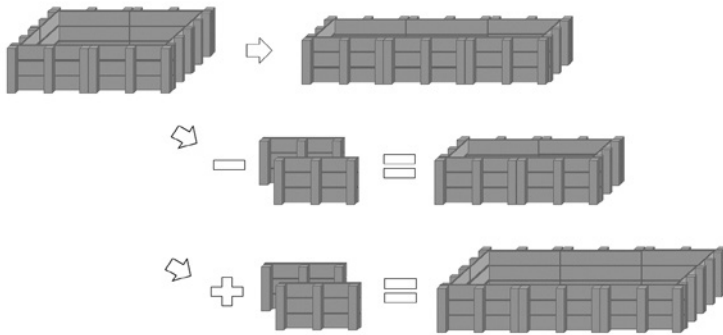


Figura 34 – Exemplos de possibilidades de adaptação conferidas pelo uso de elementos estruturais individuais.

Outra vantagem do sistema modular por componentes, reside em facilitar a substituição do enchimento quando este atingir o seu tempo de vida útil, ou caso seja necessário proceder à modificação do sistema, por exemplo para adaptar o tipo de enchimento a modificações nas características da água a tratar. Para o efeito, bastará usar um sistema para içar a tela que retém o material de enchimento, com a possibilidade de se remover temporariamente alguns elementos para facilmente aceder ao conteúdo.

O sistema modular permite também construir sistemas de contenção para outros processos de tratamento de águas, incluindo o tratamento de água potável através de meios granulares. O sistema de componentes tem ainda a vantagem de facilitar o desmantelamento e a valorização dos materiais quando for atingido o fim de vida útil das ZHCs, particularmente se o material usado na construção dos elementos for madeira.

A Figura 35 apresenta um protótipo de ZHC modular, construído com módulos de madeira de 120 cm de comprimento e 60 cm de altura. A ZHC obtida tem uma área de cerca de 1,2 m<sup>2</sup> e um volume total de 0,7 m<sup>3</sup>. Este protótipo foi usado nos trabalhos experimentais descritos no Capítulo 5.







Figura 35 – Fotografias de um protótipo de ZHC modular 1×1 construído com quatro elementos de madeira.

A Figura 36 apresenta a vista de topo do esquema de montagem da ZHC modular 1×1 da Figura 35, onde se representam os detalhes das ligações entre os elementos estruturais e as tubagens de entrada e de saída da água residual sujeita a tratamento. Na Figura 37 representa-se o esquema de montagem de um módulo 1×2, cuja área é de 2,4 m<sup>2</sup> e volume de 1,4 m<sup>3</sup>. As ZHCs de maiores dimensões podem ser construídas de modo semelhante.

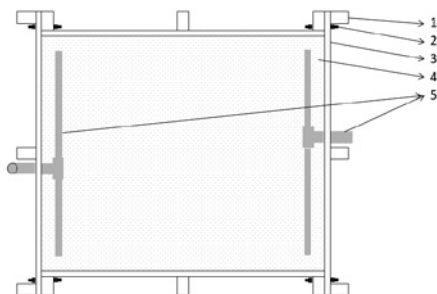


Figura 36 – Esquema de protótipo de ZHC modular 1×1 com quatro elementos estruturais de madeira: (1) Barras verticais dos componentes estruturais de madeira; (2) Elemento de ligação (varão roscado e porcas metálicas); (3) Travessas horizontais dos componentes estruturais de madeira; (4) Tela de contenção de matéria geotêxtil; (5) Tubagens de circulação da água.

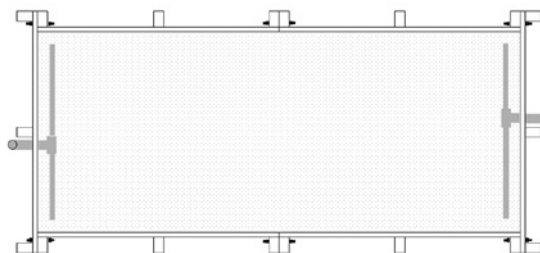


Figura 37 – Esquema de protótipo de ZHC modular 1×2 com seis elementos estruturais de madeira.

## Capítulo 8 – Conclusões e perspetivas para o futuro

Henrique J. O. Pinho, Dina M. R. Mateus

O projeto VALORBIO tinha vários objetivos motivados por vários desafios relacionados com o desenvolvimento sustentável, mas tendo em comum a necessidade de se valorizar os recursos naturais no contexto de uma Economia Circular:

- Reutilizar resíduos sólidos gerados em atividades industriais, valorizando-os como material de enchimento de Zonas Húmidas Construídas (ZHCs, que consistem em sistemas biológicos de tratamento de águas residuais);
- Conceber um sistema modular de construção de ZHCs, que possa ser baseado em materiais recicláveis e, eventualmente materiais reciclados, e que permita uma maior flexibilidade na construção, na adaptação a novas condições de operação, e na remodelação, e cujos componentes possam ser valorizados no fim de vida útil das ZHCs;
- Avaliar alternativas de valorizar a água residual tratada pelas ZHCs;
- Determinar a potencialidade de valorizar a biomassa produzida nas ZHCs, que nos estudos desenvolvidos consistiu em caniços.

Apesar da curta duração do projeto, de apenas 18 meses, os objetivos foram atingidos através de investigação aplicada desenvolvida em várias etapas coordenadas entre si, envolvendo a participação dos quatro copromotores do projeto e de várias empresas da Região Centro, incluindo colaboradores e alunos.

Foram testados dez materiais sólidos residuais, tendo-se concluído após uma primeira etapa de experimentação à escala laboratorial, que cinco destes não reúnem as melhores propriedades para serem usados como enchimento de ZHCs: bagaço de uva após processo de extração de álcool, caroços de azeitona e cascas de ovos fragmentadas, casca de pinheiro e agregados de resíduos de madeira (pellets). Os testes realizados permitiram concluir que os restantes cinco materiais possuem propriedades físicas e químicas mais apropriadas ao uso como enchimento de ZHCs. Os desperdícios de pedra calcária de Moleanos, muito usada como material ornamental na construção civil, possui uma capacidade significativa de remoção de compostos de fósforo presentes nas águas residuais. Os desperdícios de tijolos de argila usados na construção possuem uma capacidade moderada para a remoção de compostos de fósforo e de compostos orgânicos presentes nas águas residuais. As escórias de carvão, resultantes da



queima de carvão para a produção de eletricidade, demonstraram uma capacidade significativa de remoção de compostos orgânicos das águas residuais. Os granulados de cortiça, resultantes da indústria de processamento da cortiça, também demonstraram uma capacidade significativa de remoção de compostos orgânicos das águas residuais. As conchas de caracóis, descartadas nas indústrias alimentares e na restauração, conduziram a resultados ambíguos, tendo-se optado por as avaliar numa segunda etapa, em que se implementaram ZHCs de escala laboratorial.

No sentido de combinar as diferentes propriedades dos materiais residuais, procedeu-se à construção de protótipos de ZHCs de pequena escala em que o enchimento foi constituído por três camadas. A camada inferior e superior consistiu, em cada protótipo, de fragmentos de calcário, e a intermédia de cada um dos outros quatro materiais. Verificou-se que os protótipos de ZHCs com a combinação de fragmentos de calcário e escórias de carvão, e com a combinação de fragmentos de calcário e granulados de cortiça, foram os mais eficientes e regulares no tratamento de águas residuais, de vários tipos e composição, e em diferentes condições de operação.

Na sequência do estudo dos primeiros protótipos à escala laboratorial, foi construído um conjunto adicional de protótipos com quatro camadas de enchimento, sendo a inferior e superior de fragmentos de calcário, e duas camadas intermédias, de escórias de carvão e de granulados de cortiça. O efeito combinado dos três materiais mostrou ser eficiente no tratamento de vários tipos de águas residuais, incluindo do tipo urbano e do tipo industrial.

O segundo objetivo foi cumprido com sucesso, tendo-se concebido um sistema modular de construção de ZHCs, baseado em elementos estruturais de madeira. A solução encontrada foi validada através da construção de protótipos de ZHCs de escala piloto, tendo-se usado um desses protótipos no tratamento de águas residuais do tipo urbano e do tipo industrial, tendo-se obtido desempenhos idênticos, ou mesmo superiores, aos obtidos em sistemas tradicionais.

O protótipo de escala piloto foi construído com elementos estruturais de madeira. Esta solução permite valorizar recursos endógenos, e, tem ainda a vantagem de as estruturas poderem ser recicladas, inclusive para a obtenção de energia.

A água tratada pelas diferentes ZHCs foi aproveitada para ensaios de produção de algas e para rega de plantas ornamentais. Foram também efetuados testes de



avaliação da toxicidade, para verificar se o contacto da água com os materiais residuais poderia originar a libertação de substâncias prejudiciais. Os resultados foram satisfatórios, justificando a realização de ensaios de maior duração e em maior escala.

Para atingir o quarto objetivo, procedeu-se à avaliação do potencial calorífico das podas dos caniços plantados nos protótipos das ZHCs, e de madeira de pinho, material usado nos elementos estruturais das ZHCs. Os ensaios de gaseificação permitiram concluir que é vantajoso utilizar uma biomassa combinada de 10% de caniços fragmentados e 90% de estilha de pinho. A estilha de pinho pode constituir em resíduos das indústrias da fileira florestal e da limpeza das florestas, ou, no futuro, ser obtida de estruturas das ZHCs modulares em fim de vida.

Os objetivos do projeto foram atingidos, mas acredita-se que ainda se pode melhorar a sustentabilidade das ZHCs e aumentar a sua contribuição para uma Economia Circular. Para o efeito, sugere-se como trabalho futuro:

- A realização de estudos piloto de longa duração para verificar se os materiais residuais, que não foram selecionados para a construção dos protótipos finais, poderão ser usados como enchimento das ZHCs, eventualmente em combinação com outros materiais; mesmo que esses materiais demonstrem um desempenho inferior aos selecionados, o seu uso continua a apresentar vantagens nas perspetivas ambiental e económica de valorização de resíduos; poderão, também, ser efetuados estudos equivalentes com outros materiais residuais;
- A realização de testes de maior escala do uso da água tratada para rega, incluindo sistemas hidropónicos, e para cultivo de algas, visto os resultados obtidos nos testes de pequena escala terem sido promissores;
- A avaliação de mais alternativas de valorização da biomassa produzida nas ZHCs, incluindo a produção de diferentes tipos de macrófitas e a obtenção de produtos de valor acrescentado, além das aplicações energéticas.







[www.biotec.ipt.pt](http://www.biotec.ipt.pt)



Instituto  
Politécnico  
de Tomar



**biotec.ipt**

Laboratório de Bioenergia  
e Biotecnologia Aplicada

POCI-01-0145-FEDER-23314

**COMPETE**  
**2020**

**PORTUGAL**  
**2020**



UNIÃO EUROPEIA

Fundo Europeu  
de Desenvolvimento Regional