

Jacinto-de-água: de espécie invasora a biomassa para produção de energia por digestão anaeróbia

Bernardo Miguel de Almeida e Nunes

Dissertação para a obtenção do Grau Mestre em
Engenharia do Ambiente

Orientador(a): Doutora Rita do Amaral Fragoso

Júri:

Presidente:

Doutora Cláudia Saramago de Carvalho Marques dos Santos Cordovil, Professora auxiliar do(a) Instituto Superior de Agronomia da Universidade de Lisboa

Vogais:

Doutor Miguel Pedro de Freitas Barbosa Mourato, Professor Auxiliar do(a) Instituto Superior de Agronomia da Universidade de Lisboa;

Doutora Rita do Amaral Fragoso, Professora Auxiliar do(a) Instituto Superior de Agronomia da Universidade de Lisboa.

Resumo

O principal objetivo deste estudo foi verificar a potencialidade de produção de biogás a partir de jacinto de água recorrendo a digestão anaeróbia em sistema *batch* (com volume útil dos reatores de 350 mL). A biomassa de jacinto de água foi sujeita a pré-tratamento, incluindo secagem solar e tratamento mecânico para a preparação de polpas. A secagem por radiação solar, ao fim de 26 dias, conduziu a um aumento de aproximadamente 78% de sólidos totais relativamente ao valor da biomassa fresca.

Para além da monodigestão do jacinto de água testou-se o regime de codigestão, utilizando chorume de porco, para avaliar se havia melhor desempenho do processo de bioconversão. Realizaram-se dois ensaios independentes: ensaio 1 com 4 modalidades, onde a primeira modalidade é composta por chorume, a segunda e terceira por polpa de jacinto a diferentes razões de substrato:inóculo e a quarta com polpa jacinto de água com chorume; e o ensaio 2 com 3 modalidades com as mesmas razões substrato:inóculo de 1:2, onde a primeira modalidade é composta por chorume, a segunda polpa de jacinto de água e a terceira pela mistura de polpa jacinto de água com chorume. Em ambos os ensaios, se utilizou um controlo, apenas contendo inóculo. A melhor produção específica de biogás, envolvendo jacinto de água, foi de 237 mL/g de sólidos voláteis totais, obtida para a polpa de jacinto e com uma razão substrato:inóculo de 1:2. Apesar de serem necessários mais estudos, a estratégia proposta permitiria melhorar a qualidade dos ecossistemas dos cursos de água através da eliminação de uma planta infestante e aproveitando-se as águas residuais produzidas pela indústria pecuária. Esta opção poderia vir a ter impactes positivos no setor energético, pela distribuição deste biogás após ser purificado na rede de gás natural, ou sua comercialização para o setor automóvel e industrial.

Palavras-Chave: Digestão anaeróbia; jacinto de água; biogás; planta invasora

Abstract

The aim of this thesis was to evaluate the potential of biogas production with water hyacinth (WH) by anaerobic digestion on a *batch* system (with a working volume on the reactors of 350 mL). The biomass of water hyacinth was pre-treated, including solar drying and mechanical treatment for the preparation of pulps. The solar drying process, after 26 days, lead to an increase in 78% of total solids, relatively to the fresh biomass.

Beyond the mono-digestion of WH, the co-digestion was also tested by using pig slurry, to evaluate the impact on the efficiency of the bioconversion process. Two independent trials were performed: trial 1 with 4 modalities, in which the first one is composed by slurry, the second and third by WH pulp at different substrate to inoculum (S:I) ratios and the fourth by the mixture of WH and slurry. On the trial 2 with 3 modes with the same S:I of 1:2, on which the first mode was composed by slurry, the second one by WH pulp and the third one by the mix of WH and slurry pulp, the same procedure was made on the second trial. On both trials, controls only with inoculum were also analyzed. The best specific biogas production with water hyacinth as a substrate was 237 mL/g of total volatile solids, obtained with WH pulp at a S:I of 1:2. Although further studies are needed, the proposed strategy would contribute to improve the quality of watercourse ecosystems by eliminating a weed plant and make good use of wastewater produced by the livestock industry. This option of biogas production could lead to positive impacts on the energetic sector, by the distribution of biogas after it is purified on the natural gas facilities, or it could be commercialized for the automobile and industrial sectors.

Keywords: Anaerobic digestion; water hyacinth; biogas; invasive plant

Agradecimentos

À Professora Doutora Rita Fragoso pela ajuda, amizade, simpatia, apoio, incentivo, orientação científica, pelos conhecimentos transmitidos e pela total disponibilidade com que sempre me recebeu.

Muito obrigado!

Agradeço aos professores que me ajudaram em muitos processos de estudo prévios à conceção da dissertação.

Agradeço aos técnicos Domingos Figueiredo e Paula Gonçalves pela ajuda na concretização deste trabalho em laboratório.

Aos meus colegas que me ajudaram nos trabalhos de grupo e em todas as áreas de estudo que fizeram parte do currículo de estudo do ISA.

Grato ainda a todos os professores que me acompanharam durante toda a minha formação, escolar e académica.

Aos meus pais e irmã pelos ensinamentos e pelas ajudas nas despesas da faculdade e transporte, e claro, o amor familiar e incentivo constante, quando as coisas não corriam tão bem, para estudar mais e melhor.

Agradeço à restante família pelo incentivo e apoio incondicional, e um agradecimento especial à minha avó paterna que sempre me ajudou na logística.

Índice

1. Introdução	5
1.1. Enquadramento	5
1.2. Objetivos.....	6
1.3. Organização da dissertação	6
2. Estado de arte	7
2.1. Espécie Invasora: O jacinto de água	7
2.1.1. Características.....	7
2.1.2. Ocorrência, impactes ambientais e Estratégias de Controlo.....	9
2.2. Vias de valorização energética do JA.....	11
2.3. Digestão Anaeróbia (DA).....	14
2.3.1. Processo e Fases da DA.....	14
2.3.2 Parâmetros de controlo do processo de DA.....	16
2.3.3. Estado de arte da digestão anaeróbia de JA.....	19
3. Materiais e métodos	21
3.1. Origem e pré-tratamento da biomassa	21
3.3. Caracterização físico-química	22
3.4. Delineamento dos ensaios de DA em <i>batch</i>	22
3.5. Potencial teórico de produção de biogás.....	25
4. Resultados e discussão	25
4.1. Caracterização físico-química das biomassas e polpas.....	25
4.2 Determinação da produção teórica de biogás	30
4.3. Determinação experimental da produção de biogás	30
5. Conclusões.....	35
6. Bibliografia.....	36
7. Anexos	A

Índice de tabelas

Tabela 1: Caracterização físico-química da biomassa de JA referida por diversos autores.....	8
Tabela 2: Resumo de valores recomendados para alguns dos parâmetros mencionados (para reatores do tipo <i>continuous stirring tank reactor</i> (CSTR) operando em regime mesofílico (Mitchell et al., 2015; Drosig, 2013).	18
Tabela 3: Revisão do estado de arte através de bibliografia selecionada.	20
Tabela 4: Composição das várias misturas reacionais, com base nos sólidos voláteis.	24
Tabela 5: Composição das várias misturas reacionais, com base nos sólidos voláteis.	24
Tabela 6: Caracterização da biomassa de JA.....	25
Tabela 7: Análise físico-química dos substratos utilizados para o ensaio 1.	27
Tabela 8: Análise da evolução do pH no ensaio 1.	27
Tabela 9: Potencial Redox dos digeridos obtidos no ensaio 1.....	28
Tabela 10: Caracterização do conteúdo em sólidos dos digeridos obtidos nas várias modalidades do ensaio 1.	28
Tabela 11: Análise físico-química dos substratos utilizados para o ensaio 2.	28
Tabela 12: Análise da evolução do pH no ensaio 2.	29
Tabela 13: Potencial Redox dos digeridos obtidos no ensaio 2.....	29
Tabela 14: Caracterização do teor de sólidos dos digeridos obtidos nas várias modalidades do ensaio 2.....	29
Tabela 15: Remoção de SVT alcançadas nas diferentes modalidades testadas no ensaio 2.....	30
Tabela 16: Coeficientes e resultados do cálculo teórico de produção de biogás e metano.	30
Tabela 17: Biogás acumulado e produção específica de biogás do substrato no ensaio 1, por modalidade.....	32
Tabela 18: Biogás acumulado e produção específica de biogás do substrato no ensaio 2, por modalidade.....	34

Índice de Figuras

Figura 1: Fotografia da planta e seus rebentos (https://www.hisour.com/pt/eichhornia-crassipes-41042/).....	7
Figura 2: Mapa dos países infestados com a planta originária da América do Sul (JA).....	9
Figura 3: Mapa de Portugal Continental e arquipélagos com regiões afetadas pela infestante a vermelho (https://www.invasoras.pt/pt/planta-invasora/eichhornia-crassipes).....	10
Figura 4: Variabilidade de disponibilidade da infestante tendo-se em linha de consideração a variabilidade de escoamento (Bergier et al., 2012).....	10
Figura 5: Esquema-resumo das principais formas de produção de energia.....	12
Figura 6.: Processo de Digestão anaeróbia e suas fases (esquema adaptado de Mitchell et al., 2015).....	14
Figura 7: JA completo com parte radicular.....	21
Figura 8: Parte aérea do JA.....	21
Figura 9.: JA seco ao sol.....	22
Figura 10: Montagem para produção de biogás em termos volumétricos.....	23
Figura 11: Pormenor da montagem experimental.....	23
Figura 12: Evolução dos ST da biomassa seca ao sol ao longo do tempo de secagem.....	26
Figura 13: Biogás acumulado no decorrer do ensaio 1, por modalidade. Onde: E1M1 - Chorume (S:I 1:2); E1M2 - JA (S:I 1:2); E1M3 - JA (S:I 1:1); E1M4 - JA + Chorume (S:I 1:2).....	31
Figura 14: Perfil da curva de produção de biogás durante os primeiros 5 dias.....	31
Figura 15: Biogás acumulado no decorrer do ensaio 2, por modalidade. Onde: E2M1-Ch; E2M2-JA; E2M3-JA+Ch, todos S:I de 1:2.....	33
Figura 16: Perfil da curva de produção de biogás durante os primeiros 5 dias.....	33

Lista de Abreviaturas

AGV - Ácidos Gordos Voláteis

$B_{\text{teórico}}$ - Potencial teórico de produção de Biogás

Ch - Chorume

CQO - Carência Química de oxigênio

CSTR - *Continuous stirring tank reactor*

DA - Digestão Anaeróbia

JA - Jacinto de Água

$M_{\text{teórico}}$ - Potencial teórico de produção de metano

M_x - Modalidade x (sendo x um número)

OLR - *Organic Loading Rate*

Razão C/N - Razão Carbono, Azoto

Razão S:I - Razão Substrato, Inóculo

ST - Sólidos Totais

SVT - Sólidos Voláteis Totais

1. Introdução

1.1. Enquadramento

A problemática das alterações climáticas, em grande parte resultantes da pegada carbónica associada ao setor da energia, tem levado ao aumento da procura pelas energias provenientes de fontes renováveis (Soltanian et al., 2020).

Vários estudos apontam a biomassa, na qual se incluem resíduos de origem florestal, agroindustrial, resíduos sólidos urbanos, entre outros, constitui uma matéria-prima relevante para a recuperação de energia. A biomassa lenhocelulósica, em particular, constitui um stock sustentável para a produção de biocombustíveis de segunda geração (Varanasi et al., 2017).

Segundo Varanasi et al., 2017, o processamento da biomassa na ótica de uma biorrefinaria, em que são aplicados processos em cascata permitindo obter diversos coprodutos, entre os quais a energia pode conduzir a uma recuperação de cerca de 60% da energia contida na biomassa. O autor refere como exemplo um processo em três estágios que permite produzir hidrogénio, metano e eletricidade.

As vias bioquímicas de conversão de biomassa em bioenergia, que podem incluir a digestão anaeróbia, a fermentação na ausência de luz (dark fermentation), etc. são opções atrativas, mas se aplicadas a biomassa lenhocelulósica têm baixo rendimento de obtenção de energia (Varanasi et al., 2017). Este facto deve-se à biomassa lenhocelulósica ser composta maioritariamente por celulose, hemiceluloses e lenhinas, sendo estas últimas de difícil biodegradabilidade. Para facilitar a separação dos constituintes referidos, para que os açúcares complexos que contenham celulose e hemicelulose ligados entre si sejam separados em açúcares simples, aplicam-se pré-tratamentos. Algumas estratégias de pré-tratamento disponíveis são os métodos físicos, químicos e a conjugação de vários (Sindhu et al., 2017).

As plantas invasoras, como o jacinto de água que foi introduzida antropogenicamente nos cursos de água superficiais, podem ser usadas como biomassa para a produção de energia (O'Sullivan et al., 2010). O jacinto de água (*Eichhornia crassipes*) é uma macrófita flutuante, que cresce entre 5 a 8 cm em altura, e consegue manter as suas sementes ativas por 28 anos, com taxas de crescimento rápido (Ajithram et al., 2020). Por este motivo, a eliminação desta macrófita dos cursos de água tem sido um problema de difícil resolução. Deste modo, é importante procurar vias de valorização para esta biomassa que contribuam para suportar os custos associados à sua remoção e promovam a circularidade.

O alto teor de celulose e a biodegradabilidade são características que tornam o jacinto de água adequado para a produção de energia, no entanto tem a desvantagem de possuir uma elevada percentagem de água, cerca de 90% (Rezania et al., 2015).

Várias rotas têm sido propostas para a valorização energética do jacinto de água, entre as quais a combustão, pirólise, gaseificação e digestão anaeróbia (Gaurav et al., 2020; Rezania et al., 2015).

A digestão anaeróbia tem sido estudada por alguns autores. Shah et al., 2015, avaliaram a monodigestão do jacinto de água, tendo obtido uma taxa de produção de biogás de 1000 mL/dia e produção específica de 1200 mL/g SV. Rathod et al., 2018 também efetuaram a monodigestão do jacinto de água tendo obtido biogás com 55-58% de metano. No entanto, no sentido de otimizar o processo de bioconversão devem realizar-se estudos em que o jacinto de água é digerido juntamente com outro substrato, codigestão. Esta opção permite obter uma mistura de alimentação mais equilibrada, por exemplo no que se refere à razão C:N.

1.2. Objetivos

O objetivo geral desta dissertação é contribuir para a valorização da planta invasora jacinto de água, que tem que ser retirada dos ecossistemas aquáticos gerando uma elevada quantidade de biomassa, recorrendo à tecnologia de codigestão anaeróbia e, assim, contribuir para a sustentabilidade do processo de controlo da espécie invasora. Os objetivos específicos são: (i) avaliar o potencial de produção de biogás do jacinto de água, (ii) avaliar o efeito da mistura com co-substrato(s) de modo a otimizar a recuperação de bioenergia.

1.3. Organização da dissertação

Esta dissertação está organizada em 6 capítulos:

Capítulo 1 – Introdução: faz-se o enquadramento do tema e apresentam-se os objetivos propostos;

Capítulo 2 – Estado de arte: faz-se a revisão da literatura relativa ao tema abordado, de modo a fundamentar o trabalho desenvolvido nesta dissertação;

Capítulo 3 – Material e métodos: descrição dos materiais utilizados, métodos de caracterização físico-química adotados e delineamento experimental dos ensaios, bem como de metodologias de cálculo adotadas;

Capítulo 4 – Resultados e discussão: neste capítulo apresentam-se os resultados dos ensaios laboratoriais incluindo da caracterização físico-química das polpas e da biomassa utilizadas (4.1), do cálculo teórico da produção de biogás com recurso à equação de Buswell (4.2), e da determinação laboratorial da produção específica de biogás do substrato em dois ensaios independentes (4.3).

Capítulo 5 – Conclusões: apresentação das conclusões globais desta dissertação, bem como da análise crítica dos objetivos atingidos e perspetivas de trabalho futuro.

Capítulo 6 – Referências bibliográficas.

2. Estado de arte

2.1. Espécie Invasora: O jacinto de água

2.1.1. Características

O nome científico da conhecida espécie invasora Jacinto de Água (JA) é *Eichornia Crassipes*, considerada no mundo como uma planta que provoca ambientes aquáticos anóxicos, com necessidades de absorção de nutrientes muito elevada e com uma alta taxa de reprodução (produzem 14×10^7 rebentos por ano). O JA pode cobrir até $1,4 \text{ km}^2$ de cursos de água, produzindo uma quantidade de biomassa fresca que pode chegar a $28 \times 10^3 \text{ t}$ por ano. O JA pode afetar severamente a qualidade de vida nesses recursos hídricos já que a área coberta pela invasora cria condições ideais de nidificação dos mosquitos que podem ser vetores de propagação de doenças; por outro lado, promove o decréscimo dos ativos populacionais do meio hídrico e sua biodiversidade, devido ao ambiente anóxico criado. O ciclo fenológico da planta pode incluir a sua propagação de forma vegetativa, pela via dos rebentos, ou pela via sexuada através de sementes. A rapidez de ocupação de cursos de água também constitui um problema pois, em condições propícias, numa semana a quantidade de indivíduos pode duplicar (Su et al., 2018).

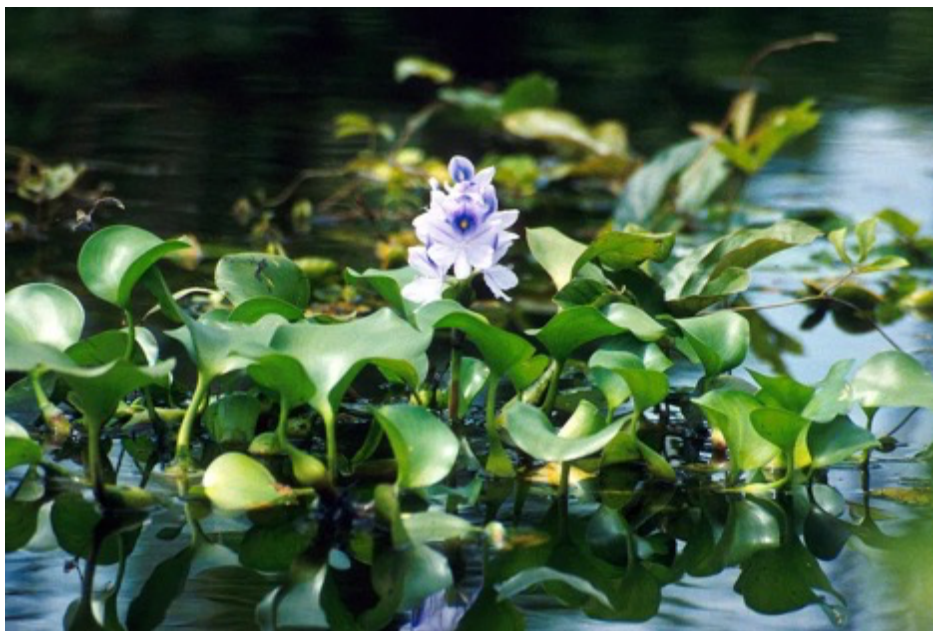


Figura 1: Fotografia da planta e seus rebentos (<https://www.hisour.com/pt/eichhornia-crassipes-41042/>).

A taxa de crescimento do JA é mais elevada na Primavera, ocorrendo uma diminuição no Outono devido à descida da temperatura e à formação de geadas. Como foi referido anteriormente existem dois métodos de reprodução da planta que são a via vegetativa, através de rizomas ou pequenos fragmentos (rebentos) que podem originar uma

nova planta, cada fragmento pode ser arrastado pela corrente e originar novos focos de invasão distantes da população original (fig. 1), também se reproduz por via sexuada, onde as sementes mantêm-se viáveis durante muitos anos (até 20 anos) e devido às suas reduzidas dimensões são facilmente arrastadas pela corrente. As sementes são também dispersas por aves aquáticas, isto é, pelo sistema excretor dos seres vivos (adaptado de <https://www.invasoras.pt/pt/planta-invasora/eichhornia-crassipes>).

As características físico-químicas da biomassa de JA variam muito em função do grau de desenvolvimento da planta e das condições do local onde cresceram, no entanto na tabela 1 apresentam-se intervalos de valores para alguns parâmetros físico-químicos referidos por diversos autores. Há a destacar o facto de o JA ser uma planta com elevado teor de humidade e com características lenhocelulósicas, o que pode tornar mais difícil o processo de bioconversão para obter energia. Outra indicação importante será a razão C/N que também condiciona a eficiência do processo de bioconversão (Su et al., 2018; Varanasi et al., 2017).

Tabela 1: Caracterização físico-química da biomassa de JA referida por diversos autores.

Parâmetro (% ms)	Intervalo valores	Referências bibliográficas
Humidade (% mf)	90 - 96	Varanasi et al., 2017; Rathod et al., 2018; Su et al., 2018
Celulose	17 - 31	Varanasi et al., 2017; Rathod et al., 2018; Su et al., 2018
Hemicelulose	18 - 44	Varanasi et al., 2017; Rathod et al., 2018; Su et al., 2018
Lenhina	5 - 27	Varanasi et al., 2017; Rathod et al., 2018; Su et al., 2018
Cinzas	10 - 26	Varanasi et al., 2017; Rathod et al., 2018; Su et al., 2018
Fósforo	0,28 - 0,77	Rathod et al., 2018; Su et al., 2018
Carbono	18 - 38,5	Su et al., 2018; Varanasi et al., 2017
Azoto	0,74 - 2,9	Varanasi et al., 2017; Rathod et al., 2018; Su et al., 2018
Magnésio	0,17 e 0,65	Su et al., 2018
Cálcio	0,58 - 3,08	Rathod et al., 2018; Su et al., 2018
Potássio	2,27 - 4,13	Rathod et al., 2018; Su et al., 2018
Razão C/N (%)	11 - 25,1	Su et al., 2018; Varanasi et al., 2017

2.1.2. Ocorrência, impactes ambientais e Estratégias de Controlo

O JA tornou-se um problema global (fig. 2) e nacional, devido ao facto de o mesmo ter sido transportado antropogenicamente para os cursos de água de forma indevida (Carlini et al., 2018) e devido à sua taxa de crescimento ser bastante elevada em zonas de clima tipicamente tropical.

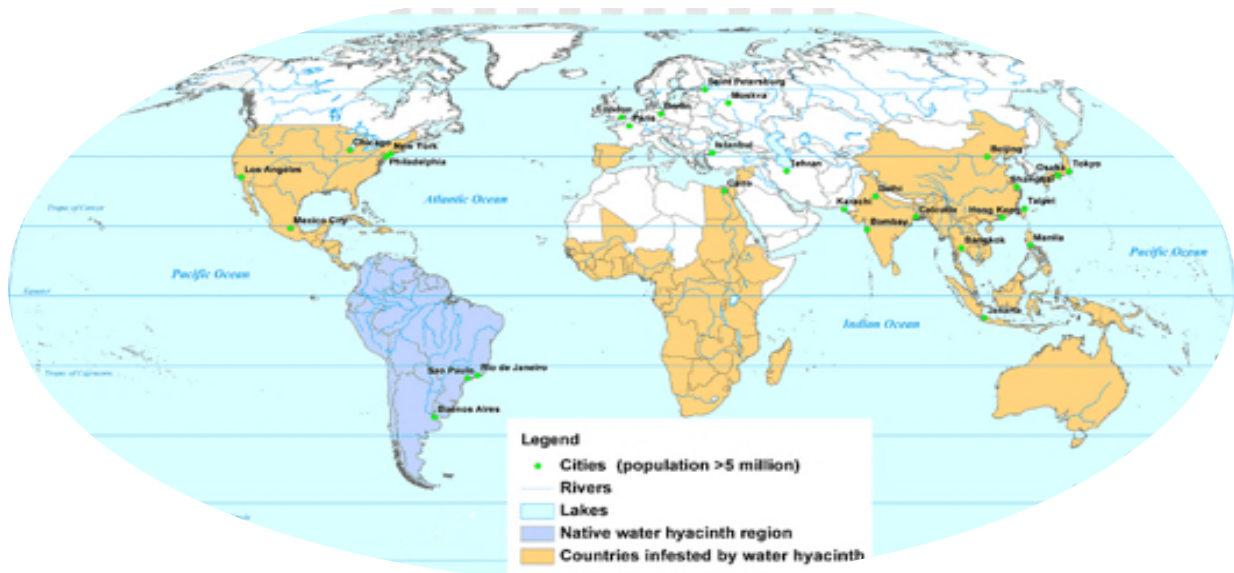


Figura 2: Mapa dos países infestados com a planta originária da América do Sul (JA).

Dada a distribuição global da infestante torna-se necessário e importante retirá-la dos ecossistemas ripários, mas há que tornar este processo o mais viável do ponto de vista económico e sustentável. Assim, a valorização desta biomassa para produzir bioenergia ou biofertilizantes para a agricultura, conferia valor acrescentado a algo que hoje em dia não é valorizado, evitando-se a ocorrência de eutrofização dos cursos lagunares ou ripários (Güereña et al., 2015).



Figura 3: Mapa de Portugal Continental e arquipélagos com regiões afetadas pela infestante a vermelho (<https://www.invasoras.pt/pt/planta-invasora/eichhornia-crassipes>).

A disponibilidade de JA numa determinada região com clima tropical é variável devido às diversas possibilidades de reprodução que a planta tem, bem como ao tipo de ocupação que daí resulta, à variabilidade da disponibilidade de nutrientes e do escoamento/nível hídrico da região (Bergier et al., 2012). A figura 4 ilustra a variabilidade da oferta natural da biomassa em estudo, em contexto de clima tropical.

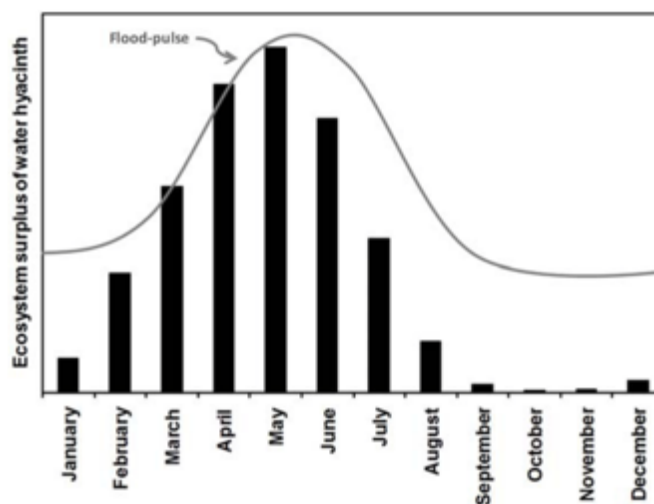


Figura 4: Variabilidade de disponibilidade da infestante tendo-se em linha de consideração a variabilidade de escoamento (Bergier et al., 2012).

A presença do JA em cursos de água origina três problemáticas ambientais importantes: problemas de saúde humana associadas ao crescimento de larvas de mosquito nas superfícies aquáticas cobertas pela invasora, a

diminuição de ativos populacionais aquáticos, fundamentalmente peixe devido à depleção de oxigénio causada pelo JA criando um ambiente anóxico ou mesmo anaeróbio e, por último, o facto de a evapotranspiração aumentar para mais de três vezes, isto comparando com um curso de água saudável (Rathod et al., 2018).

Como se sabe o JA é uma planta que devido à sua abundância e ao seu crescimento não controlado em diversos cursos de água, é uma das invasoras consideradas mais problemáticas (Rezania et al., 2015).

Atualmente é costume recorrer-se à pulverização de um herbicida foliar para controlo de infestantes (controlo químico), recorre-se a um controlo mais físico através da remoção das plantas no local invadido, e finalmente, também é usual recorrer-se ao controlo biológico através da libertação de agentes de controlo biológico como fungos e pequenos artrópodes, sendo este último controlo pouco usado em Portugal (<https://www.invasoras.pt/pt/planta-invasora/eichhornia-crassipes>).

Como medidas de controlo e erradicação desta espécie tem-se a implementação de estudos descentralizados para aproveitamento energético, outras tentativas passam pela aplicação de biocidas ou recorrendo a técnicas tipicamente biológicas de erradicação de plantas como é o caso explícito anteriormente de colocação de pragas e doenças fatais para a planta, ou a implementação de plantas tipicamente competitivas no meio afetado (Güereña et al., 2015; Wilson et al., 2007).

Mais em específico, devem-se adotar por isso, medidas não de eliminação/erradicação do JA mas de reutilização da biomassa para aproveitamento energético com recurso a diversas técnicas de produção energética sobre as quais se incluem a digestão anaeróbia, a fermentação em escuro, a gaseificação, entre outras técnicas, tal como se refere na secção seguinte.

2.2. Vias de valorização energética do JA

Têm sido desenvolvidos vários estudos que avaliam possíveis vias de valorização energética do JA (Soltanian et al., 2020; Aghbashlo, 2019). O diagrama da figura 5 sintetiza as principais vias abordadas, que serão seguidamente descritas de forma sumária.



Figura 5: Esquema-resumo das principais formas de produção de energia.

Fermentação em escuro

A fermentação em escuro define-se como um processo de produção de bioenergia anaeróbio, na presença de bactérias fermentativas termofílicas com ausência de luz para degradar um dado tipo de biomassa. E como tal este tipo de metodologia de produção de bioenergia permite a produção de hidrogénio (H_2), CO_2 e acetato, sendo que este último também se produz na fase acetogénica do processo da DA, que mais à frente será explicado. Como vantagens Levin et al., 2006 aponta a fermentação em escuro como metodologia de produção de energia que apresenta melhor poupança do processo pela necessidade em energia ser baixa, simplicidade do processo, maiores taxas de produção de H_2 e a hipótese de utilização de resíduos de baixo valor comercial como substrato. Assim, em casos mais específicos o meio de fermentação é ajustado a um pH de 6,5, as condições anaeróbias devem-se manter, dispersando-se azoto gasoso para um determinado regime temporal previamente escolhido. Todo este processo termina se, e só se, a produção de hidrogénio terminar (Varanasi et al., 2017). Assim sendo, para que esta via de valorização possa ocorrer é necessário que a biomassa tenha na sua constituição celulose (de que é exemplo o JA) ou outras fontes de carbono orgânico disponíveis para que os microrganismos fermentativos possam produzir o hidrogénio (Collet et al., 2004; Levin et al., 2006; Magnusson et al., 2008; O-Thong et al., 2008).

Produção de Bioeletricidade (*Microbial Fuel Cell*)

Este processo envolve a utilização direta de biomassa lenhocelulósica (JA) e sua conversão direta em bioenergia, tornando-o um processo atrativo do ponto de vista ambiental, pois utiliza pouca energia. Uma das desvantagens da sua utilização como meio de produção de energia são o baixo rendimento do processo e o seu reaproveitamento para outros tipos de aplicações, como é o caso da injeção da bioenergia na rede elétrica, bem como a necessidade de tratamento dos efluentes gerados durante a produção.

Segundo Varanasi et al., 2017 e Pham et al., 2006, outra forma de produção de energia, neste caso, pela obtenção de metano como complemento da etapa da metanogénese incluída no processo da DA será recorrendo à tecnologia de MFC, onde se utiliza um volume de reator útil com a mesma capacidade do método anteriormente referido e onde a geração de bioeletricidade é conseguida pelo ânodo que será uma cinta de carbono ligado a um tubo de aço condutor para desempenhar o papel de terminal, finalmente o cátodo, que neste caso é uma membrana especial, estará ligado a toda esta estrutura para se estabelecer uma corrente elétrica recorrendo-se a substratos típicos de biomassa disponível (Varanasi et al., 2017).

Pirólise

A pirólise é um processo de decomposição térmica num ambiente operacional anóxico para produzir bio-óleos ou biofuels, gases de síntese, e biochar. Este processo tem uma maior rapidez, elevada taxa de produção energética e não tem necessidade de pré-tratamentos tornando-o com menores custos de operação (Aghbashlo, 2019; Gaurav et al., 2020; Soltanian et al., 2020).

A título de exemplo, esta via de valorização torna-se útil na medida em que permite converter de forma direta biomassas tipicamente mais densas e/ou heterogéneas em formas convenientes de energia para os utilizadores, pois permite uma maior estabilização do carbono presente na biomassa vegetal, como é o caso do JA (Gaurav et al., 2020).

Gaseificação

Uma conversão parcial de substratos tipicamente ricos em carbono (biomassas com elevados teores de carbono) em gases de síntese através de compostos condensáveis com vantagens semelhantes às referidas no processo anteriormente discriminado (Soltanian et al., 2020).

Como principais gases de síntese normalmente produzidos tem-se o ar, o azoto, o oxigénio (O₂), o CO₂, vapores ou uma mistura de todos os gases referidos. Este processo ocorre usualmente sob condições térmicas compreendidas entre os 700 e os 900 °C, via energética esta perfeitamente aplicável ao JA, uma biomassa tipicamente lenhocelulósica e com conteúdo em carbono considerável (Gaurav et al., 2020).

Digestão Anaeróbia

A digestão anaeróbia, por ser objeto de aplicação na componente laboratorial desta dissertação, será analisada em maior detalhe na secção seguinte.

2.3. Digestão Anaeróbia (DA)

2.3.1. Processo e Fases da DA

Digestão anaeróbia é o termo usado para descrever a degradação de materiais biodegradáveis feita por microrganismos em total ausência de oxigênio. O carbono contido na matéria biodegradável é convertido em biogás, uma mistura que tem como componentes principais metano e dióxido de carbono (O'Sullivan et al., 2010). O processo de DA desenvolve-se em quatro etapas: hidrólise, acidogénese, acetogénese e metanogénese tal como se ilustra na figura 6 e se descreverá de seguida.

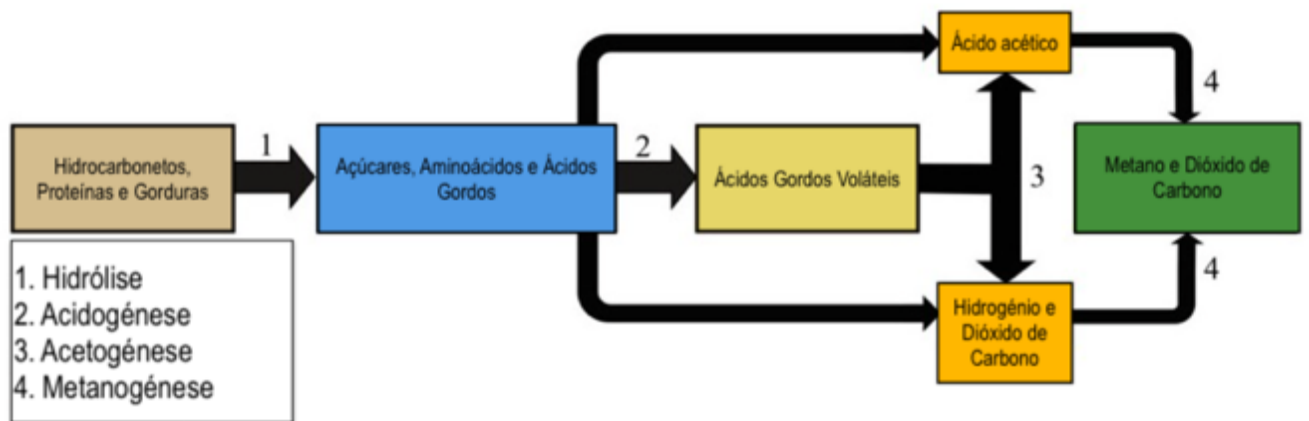


Figura 6.: Processo de Digestão anaeróbia e suas fases (esquema adaptado de Mitchell et al., 2015).

1. Hidrólise

A hidrólise é o primeiro estágio da DA, cuja reação se apresenta na equação 1.1. Nesta etapa, as bactérias hidrolíticas segregam enzimas extracelulares que convertem os hidratos de carbono, lípidos e outras moléculas orgânicas de cadeia longa provenientes do substrato em moléculas mais simples, que ficam disponíveis para serem utilizadas na segunda fase da DA (fundamentalmente açúcares, aminoácidos e ácidos gordos).

No caso de biomassas lenhocelulósicas, existe uma certa dificuldade de degradabilidade das moléculas orgânicas mais complexas, que devido à sua estrutura são dificilmente acessíveis aos microrganismos. Por esse motivo é muito usual efetuar-se o pré-tratamento da biomassa, de modo a “desconstruir” a estrutura complexa e facilitar o processo de bioconversão (Meegoda et al., 2018). Esta fase da DA torna-se assim importante pois é nesta etapa

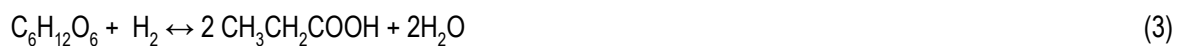
que se disponibilizam as moléculas orgânicas mais simples para que o processo possa continuar, é considerada a etapa limitante do processo.



Como é possível observar-se pela equação 1 um dos produtos de reação gerados pelo processo de hidrólise é o hidrogénio (Anukam et al., 2019).

2. Acidogénese

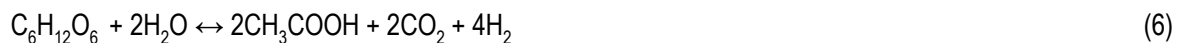
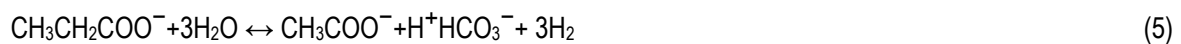
A acidogénese é uma etapa da DA que se caracteriza por ser das mais rápidas, implicando tempos de retenção menores que as 36h. O facto de esta fase ser das mais rápidas de todo o processo de digestão anaeróbia torna importante salientar que enquanto existe produção de ácidos gordos voláteis (AGVs) criam-se precursores que permitem a ocorrência da etapa da metanogénese (equações 2 a 4), como é o caso do ácido acético representado na equação 4 (Meegoda et al., 2018).



3. Acetogénese

Com a produção de acetato através da acidogénese, uma porção do substrato original já deverá ter sido transformada num substrato biodisponível para a metanogénese acetoclástica. No entanto, outros AGVs produzidos podem ser acessíveis para os microrganismos metanogénicos (Meegoda et al., 2018).

Assim, a acetogénese é a etapa do processo da DA em que AGVs de cadeia maior e outras substâncias intermediárias do processo bioquímico são convertidos em acetato com a produção simultânea de hidrogénio tal como indicam as equações 5 a 7 (Anukam et al., 2019).



4. Metanogénese

A metanogénese marca o final do processo de DA, nesta fase os compostos intermediários disponíveis são consumidos por microrganismos produzindo-se gás metano de biossíntese.

As reações que ocorrem nesta etapa apresentam-se abaixo (8 a 10).



A primeira equação (8) ilustra a conversão do ácido acético (CH_3COOH), formado na etapa anterior, em metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2). O CO_2 formado é reduzido a CH_4 através do H_2 gasoso, tal como se apresenta na segunda equação 9 (Anukam et al., 2019). Finalmente, na equação 10 é possível observar-se a produção de CH_4 através da descarboxilação do $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$.

Assim, as bactérias metanogénicas podem ser divididas em dois grandes grupos, as acetogénicas e as hidrofílicas; as primeiras produzem metano a partir da descarboxilação do acetato enquanto as últimas refletem a produção de metano pela redução de H_2/CO_2 . Para o processo da DA existem 6 principais modelos de produção de metano. Cada forma de produção permite a conversão de diferentes substratos em CH_4 gasoso, neste caso os principais substratos utilizados na fase da metanogénese são o ácido acético, o ácido metanoico (HCOOH), o dióxido de carbono, o sulfato de dimetilo ($(\text{CH}_3)_2\text{SO}_4$), metanol (CH_3OH), e a metilamina (CH_3NH_2) (Anukam et al., 2019).

2.3.2 Parâmetros de controlo do processo de DA

Nesta secção pretende-se descrever de forma breve a influência de cada parâmetro de controlo no decorrer do processo da DA, e qual a sua influência para a maior ou menor produção de biometano, tendo em conta o que foi referido na secção 2.3.1, acerca de cada uma das fases da DA.

pH

O pH é um importante parâmetro de controlo da digestão anaeróbia, sendo a gama ótima entre 7 e 8 (Mitchell et al., 2015). Por este motivo, é muito importante a capacidade tampão do substrato a utilizar para que o pH não diminua em demasia devido à formação de AGVs, evitando que a fase metanogénica fique comprometida. A alcalinidade é favorável para equilibrar o pH após uma fase que, como foi referido em secções anteriores, é conhecida pela acidogénese na qual as bactérias anaeróbias segregam produtos acidificantes, levando a que o

pH se torne baixo e portanto longe da gama ótima para o processo. Daí o importante papel da alcalinidade na estabilidade e arranque das restantes fases do processo da DA.

Temperatura

A temperatura tem um papel fundamental nos processos biológicos e subsequente velocidade das reações. A DA pode ocorrer em regime mesofílico, em que a temperatura está na gama dos 35°C a 55°C, em que a velocidade da degradação dos substratos se torna mais rápida, e potencialmente traduz-se numa maior produção do gás de interesse, o biometano (Mitchell et al., 2015). No entanto, também levará a um maior consumo energético para aquecimento do reator.

Teor de sólidos

O teor de sólidos totais (ST), diz respeito à porção de matéria seca contida num determinado substrato. Este parâmetro condiciona o tipo de processo a seleccionar (via húmida ou seca). Para que se possa usar a via húmida o teor de ST não deve exceder os 10%, segundo Drosig, 2013. Os sólidos voláteis totais (SVT) traduzem a quantidade de matéria orgânica que se está a administrar a um reator, sendo comumente utilizados para definir a carga orgânica de alimentação (*Organic Loading Rate*, OLR) (Mitchell et al., 2015).

Carência química de oxigénio

A carência química de oxigénio (CQO) de um determinado substrato traduz a quantidade de carbono orgânico total que poderá ser degradada pelos microrganismos, inclui a matéria orgânica biodegradável e a recalcitrante. A CQO solúvel (CQOs) diz respeito à componente da matéria orgânica que está solúvel, portanto mais diretamente disponível para a ação dos microrganismos (Mitchell et al., 2015).

Azoto

Para que a razão C/N seja equilibrada é necessário que haja uma quantidade de azoto maior ou igual à quantidade de carbono presente no substrato.

O azoto amoniacal é um dos produtos normalmente obtidos no processo de DA, por isso se o substrato utilizado for muito rico em azoto pode acumular-se um excesso de azoto amoniacal causando a inibição da DA pois este é tóxico para os microrganismos (Drosig, 2013). Para que não haja inibição o azoto amoniacal não deve exceder 1.5 to 3.0 g NH₄-N L⁻¹ (Drosig, 2013).

Potencial Redox

Em oposição com os processos aeróbios, os microrganismos anaeróbios necessitam de um potencial redox negativo para que possam metabolizar os substratos. Assim, e para o caso dos microrganismos estritamente anaeróbios, é recomendável que o potencial redox seja mais baixo do que -300 mV (Drosig, 2013).

Ácidos Gordos voláteis (AGVs)

Os AGVs são ácidos gordos de cadeia curta (por exemplo os ácidos acético, propiónico, butírico, etc.) que são produzidos durante a acidogénese e são precursores do metano (Drosg, 2013). No entanto, a acumulação excessiva de AGVs leva a que a fase da metanogénese seja inibida, e subsequentemente a produção de metano torna-se diminuta (Drosg, 2013).

Alcalinidade - razão (AGV/Alcalinidade)

A alcalinidade diz respeito à capacidade que um dado material tem em neutralizar ácidos. Os carbonatos e bicarbonatos têm por isso um papel fundamental como contributos principais na alcalinidade total, no entanto o ião amónio e o fósforo também podem contribuir para uma capacidade tampão do substrato.

Portanto, é preferível uma maior alcalinidade nos substratos, pois tal facilita a manutenção do pH próximo da neutralidade entre 7 e 8. O rácio de Ripley corresponde à razão entre ácidos gordos voláteis totais e a alcalinidade total. A alcalinidade parcial ou o rácio referido também permitem a previsão e controlo do pH ao nível da estabilidade do digestor (Mitchell et al., 2015).

Do modo geral, uma razão abaixo de 0,3 indica um processo de digestão estável (Mitchell et al., 2015).

De seguida, apresenta-se na tabela 2 o resumo de valores recomendados para alguns parâmetros mencionados anteriormente.

Tabela 2: Resumo de valores recomendados para alguns dos parâmetros mencionados (para reatores do tipo *continuous stirring tank reactor* (CSTR) operando em regime mesofílico (Mitchell et al., 2015; Drosg, 2013).

Parâmetros	Limites de estabilidade	
NH ₄ -N	<5000 mg/L	Processo estável, principalmente se o aumento do teor for lento permitindo a adaptação dos microrganismos ou se o inóculo já estiver adaptado.
	>5000 mg/L	Valores altos de NH ₄ -N aumentam a capacidade tampão contudo necessita de microrganismos adaptados e pode tornar o processo mais suscetível
pH	7 a 8	Processo estável
	<7	Inibição do processo pela acumulação de AGV
	>8	Excesso de alcalinidade leva à inibição por favorecer a acumulação de NH ₃ (aq) inibindo a atividade microbiana
ST	<10%	Concentrações superiores a 10% de ST levam a problemas de agitação em processos de via húmida
AGV totais	<1000 mg/L	Processo estável
	>4000 mg/L	Acumulação de AGV leva à acidificação do meio inibindo a metanogénese
Alcalinidade (AGV/Alc.)	<0,3	Processo estável
	>0,8	Processo instável
P. Redox	< - 300 mV	Processo estável

2.3.3. Estado de arte da digestão anaeróbia de JA

Nesta secção pretende-se apresentar os principais estudos realizados relativos à valorização energética do JA recorrendo à tecnologia de digestão anaeróbia.

Segundo O'Sullivan et al. (2010), a digestão de uma mistura de JA e estrume bovino (0.79 kg SVT de JA e 1,25 kg de SVT de estrume bovino) num reator descontínuo de 200 mL de volume útil, permitiu obter um volume acumulado de biogás de 500 mL, com uma percentagem de aproximadamente 50% de metano. A produção específica de biogás foi de 267 mL/g SVT, logo a produção específica de metano será de 50% do valor referido, ou seja, 133,5 mL/g SVT.

Outro estudo desenvolvido por Chanathaworn (2017), utilizou JA em mistura com Húmus de minhoca, usando uma razão substrato: inóculo (S:I) de 2:4 ou 2:1, tendo obtido uma produção acumulada de biogás de 700 mL, consideravelmente superior à obtida por O'Sullivan et al. (2010), mas com uma qualidade em metano de apenas cerca de 36%.

Sindhu et al., 2017, realizaram um estudo de produção de biogás a partir de JA e estrume de búfalo com uma proporção de mistura em SVT de 1:2, com um tempo de digestão de 60 dias. Foi possível obter 25,78 L de biogás, com 62% desse biogás a corresponder a metano, ou seja, algo indicador de que este processo de digestão anaeróbia adotado gera biogás de boa qualidade, pois quanto maior for a percentagem de metano, melhor são as utilidades deste biogás e as aplicações que se podem fazer sobre o mesmo.

Um estudo realizado por Castro and Agblevor, 2020b, usou como substrato exclusivamente JA e fez a comparação de diversas razões S:I (1:1; 5:1; 10:1; 30:1). Verificaram que ao fim 150 dias, e para o caso da menor razão S:I (1:1), foi possível obter uma elevada produção específica de metano de 423 mL/g SVT.

Também é de salientar o estudo realizado por (Liu et al., 2020), em que se usou uma mistura contendo JA fresco e JA seco adotando uma razão S:I de 1:1 e se fez uma modificação da circulação interna do biogás ao nível do reator com capacidade de 2,96 L onde se efetuou a separação gás-água através da submersão do reator em água para evitar perdas de biogás. Deste modo foi possível obter um biogás de elevada qualidade, aproximadamente 80% de metano. O TRH (tempo de retenção hidráulico) utilizado na quinta fase deste estudo foi de 0,9 dias (220 dias subdividido em 6 fases), com uma OLR de 17,93 kg CQO/m³.d obtendo-se uma produção de 12 L diários de biogás, com uma taxa de produção de 3,92 L de biogás/L_{reator} d e 78% de conteúdo em metano, com 82% de eficiência de remoção de CQO.

Finalmente torna-se importante referir que foram analisados outros estudos, mas destacaram-se aqui os mais relevantes para o contexto prático desta dissertação.

Na tabela 3 resume-se a informação relativa aos estudos bibliográficos analisados, que foram realizados em *batch* e em condições de temperatura mesófila.

Tabela 3: Revisão do estado de arte através de bibliografia selecionada.

Tempo digestão (dias)	Volume de Biogás acumulado (L)	% de Metano	Produção específica biogás (mL/gSVT)	Produção específica metano (mL/gSV)	Referência
80	0,5	52	267	140	(O'Sullivan et al., 2010)
4	---	53-58	---	---	(Rathod et al., 2018)
15	---	---	---	44 (2 stages)	(Varanasi et al., 2017)
15	0,7	35,5	---	120	(Chanathaworn, 2017)
20	370000 (para 1 t de ms de JA)	---	13,3	---	(Rezania et al., 2015)
60	25,78	62	---	---	(Sindhu et al., 2017)
30	---	---	---	103	(Brown et al., 2020)
70	---	70	---	399,2±32,2	(Castro and Agblevor, 2020a)
105	---	---	---	(Alto S:I) 290-423 (baixo S:I)	(Castro and Agblevor, 2020b)

3. Materiais e métodos

3.1. Origem e pré-tratamento da biomassa

As plantas de JA foram recolhidas no curso do rio Soraia, junto a Benavente. Retirou-se o excesso de água e foram transportadas para o laboratório do ISA (figura 7). De seguida procede-se ao corte da parte aérea, desprezando-se a parte radicular (figura 8).



Figura 7: JA completo com parte radicular.



Figura 8: Parte aérea do JA.

Seguidamente, esta biomassa sofreu duas etapas de pré-tratamento: secagem solar e processamento mecânico. A secagem solar foi adotada como uma estratégia simples para aumentar o teor relativo de sólidos da biomassa. As partes aéreas das plantas foram expostas à luz solar durante 15 dias, avaliando-se periodicamente o teor de ST (figura 9).

Posteriormente, a biomassa seca foi utilizada para a preparação de polpas (6% m/m) com água ou chorume, recorrendo a um liquidificador.



Figura 9.: JA seco ao sol.

O Chorume de porco foi preparado a partir da excreta de leitões fornecida pelo laboratório de zootecnia do ISA, tendo-se preparado uma mistura com água na proporção 1:5 (m/m) que se passou através de crivo de 5 mm de modo a simular o teor de sólidos característico do chorume de porco.

O inóculo foi recolhido do digestor anaeróbio mesofílico da Fábrica de Água de Frielas, Loures, e utilizado para a aporte do consórcio microbiano necessário para que o processo de digestão anaeróbia ocorra.

3.3. Caracterização físico-química

Foram realizadas análises físico-químicas ao chorume de porco e às polpas de JA:Chorume e JA:água. Determinaram-se os seguintes parâmetros: Sólidos Totais (ST) e Sólidos Voláteis Totais (SVT), Carência Química de Oxigénio (CQO) e Azoto Kjeldahl (N_k), de acordo com o Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2012). Também se fizeram análises aos ST e SVT do inóculo e dos digeridos.

Realizou-se a análise elementar (carbono, azoto, hidrogénio e enxofre) do JA no laboratório de análises do Instituto Superior Técnico de acordo com CEN/TS 15357:2006 em amostras previamente secas e preparadas de acordo com CEN/TS 15413 (boletim no Anexo I).

3.4. Delineamento dos ensaios de DA em batch

Por limitações logísticas os dois ensaios foram realizados de forma independente e em tempos distintos, em reatores de vidro de 500 mL, com um volume útil de 350 mL. Utilizou-se um banho de água para aquecimento na faixa de temperatura mesofílica (37°C). Cada modalidade foi testada em duplicado no primeiro ensaio e em triplicado no segundo ensaio. Colocou-se o substrato e o inóculo por forma a perfazer a proporção Substrato:Inóculo (S:I) expressa em SVT e completou-se com água até ao volume útil. O volume de biogás gerado foi medido diariamente por deslocamento de coluna de água.

Para cada medição, subtraiu-se a produção de biogás do inóculo ao volume de biogás produzido pelos substratos. No final do processo de digestão, as produções de biogás foram acumuladas e calculou-se a produção de biogás específica, mL biogás/g SVT.

As figuras 10 e 11 ilustram a montagem experimental para realização dos ensaios.

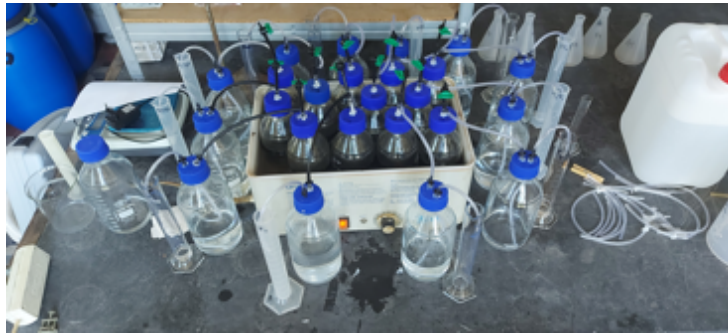


Figura 10: Montagem para produção de biogás em termos volumétricos.



Figura 11: Pormenor da montagem experimental.

Realizaram-se dois ensaios independentes, no primeiro estudaram-se quatro modalidades e no segundo três modalidades, incluindo os respetivos controlos. Nas tabelas 4 e 5 apresenta-se a quantidade de matéria fresca de cada componente necessária em cada modalidade.

Para o ensaio 1 utilizaram-se quatro modalidades onde o controlo (E1CR1) tem na sua constituição 200 g de inóculo (digerido prévio) mais 150 g de água para que o reator tenha 350 mL de volume de mistura reacional, E1M1 corresponde à modalidade 1 do ensaio 1 que tem na sua constituição 30 g de chorume mais 200 g de inóculo com uma razão S:I de 1:2, E1M2 corresponde à modalidade 2 do ensaio 1 tem 23 g de JA mais 200g de inóculo com uma razão S:I de 1:2, E1M3 designa a modalidade 3 do ensaio 1 que tem na sua composição 35 g de JA e 150 g de inóculo para uma razão de S:I de 1:1 e finalmente o E1M4 designa a modalidade 4 do ensaio 1

composta por 14 g de mistura de JA com chorume mais 200 g de inóculo, com uma razão S:I de 1:2. Em todas as modalidades se fez ao volume útil com água e fez-se em duplicado.

Para o ensaio 2 o controlo (E2CR) continha 54,1 gramas de inóculo, para o E2M1 correspondente à modalidade 1 do ensaio 2 a sua composição foi de 48,2 g de chorume mais 54,1 g de inóculo, para o E2M2 a segunda modalidade do ensaio 2 continha 24,3 g de JA mais 54,1 g de inóculo e para terceira modalidade deste ensaio, esta última era composta por uma mistura de 27 g de JA e chorume e 54,1 gramas de inóculo onde todas as modalidades do ensaio 2 tinham uma razão S:I de 1:2. Para todas as modalidades se fez ao volume útil com água e fez-se em triplicado.

Ensaio 1 (E1)

Tabela 4: Composição das várias misturas reacionais, com base nos sólidos voláteis.

Modalidade	Composição das misturas reacionais (g)				Razão S:I
	JA + Chorume	JA	Chorume	Inóculo	
E1CR	-	-	-	200	-
E1M1	-	-	30	200	1:2
E1M2	-	23	-	200	1:2
E1M3	-	35	-	150	1:1
E1M4	14	-	-	200	1:2

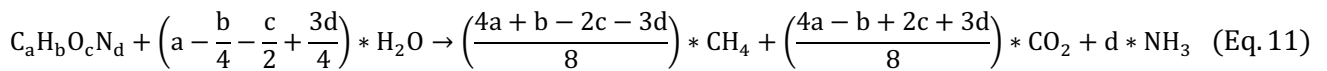
Ensaio 2 (E2)

Tabela 5: Composição das várias misturas reacionais, com base nos sólidos voláteis.

Modalidade	Composição das misturas reacionais (g)				Razão S:I
	JA + Chorume	JA	Chorume	Inóculo	
E2CR	-	-	-	54,1	-
E2M1	-	-	48,2	54,1	1:2
E2M2	-	24,3	-	54,1	1:2
E2M3	27	-	-	54,1	1:2

3.5. Potencial teórico de produção de biogás

O cálculo teórico do potencial metanogénico pode ser efetuado através da aplicação da equação de Buswell (eq. 11), a qual prevê a produção teórica de biogás ($B_{\text{teórico}}$) e metano ($M_{\text{teórico}}$) com base na composição elementar ($C_aH_bO_cN_d$) do substrato em estudo (eqs. 12 e 13), segundo C. Roati et al., 2012.



O cálculo teórico da produção de biogás e metano são dados por:

$$B_{\text{teórico}} \left(\frac{m^3}{kg_{SVT}}\right) = \frac{a * 22,415}{12a + b + 16c + 14d} \quad (\text{Eq. 12})$$

$$M_{\text{teórico}} \left(\frac{m^3}{kg_{SVT}}\right) = \frac{\left(\frac{4a + b - 2c - 3d}{8}\right) * 22,415}{12a + b + 16c + 14d} \quad (\text{Eq. 13})$$

4. Resultados e discussão

4.1. Caracterização físico-química das biomassas e polpas

Biomassa JA

A tabela 6 apresenta a caracterização físico-química efetuada à biomassa de JA fresca.

Tabela 6: Caracterização da biomassa de JA.

Parâmetro	Valor
ST (%)	3,62 ± 0,15
SVT (%)	2,97 ± 0,12
SVT/ST (%)	82
C (% ms)	37
N (% ms)	3,8
H (% ms)	5,0
S (% ms)	<2,0
C/N	9,74

A análise comparativa dos valores mencionados na tabela 6 e na tabela 1, correspondente aos valores referidos na bibliografia permite tecer alguns comentários. Pode verificar-se que o JA utilizado neste trabalho apresenta um teor de sólidos totais próximo do limite inferior do intervalo referido na bibliografia (4 a 10%), estando o teor de SVT a meio da gama de valores indicada na bibliografia (74 a 90% da matéria seca).

Em termos de análise elementar, o carbono está próximo do limite superior do intervalo referido na bibliografia (38,5% ms) e o azoto está cerca de 31% acima do valor máximo referido pelos estudos consultados (2,9% ms) (Varanasi et al., 2017; Rathod et al., 2018; Rathod et al., 2018; Su et al., 2018). Este facto faz com que a razão C/N apresente um valor próximo do limite inferior da gama referida na bibliografia (11 a 25,1), o que terá implicações no processo de bioconversão por DA, tal como referido em 2.3.2.

Avaliação do efeito da secagem solar no conteúdo de ST da biomassa de JA

A evolução do teor de ST ao longo do tempo de exposição ao sol (figura 12) permite concluir que este pré-tratamento (secagem por radiação solar), ao fim de 26 dias, conduziu a um aumento de aproximadamente 78% de ST relativamente ao valor de ST da biomassa fresca. Assim, este procedimento pode constituir uma estratégia simples para aumentar o conteúdo em ST e, conseqüentemente, SVT da biomassa a usar como substrato na DA.

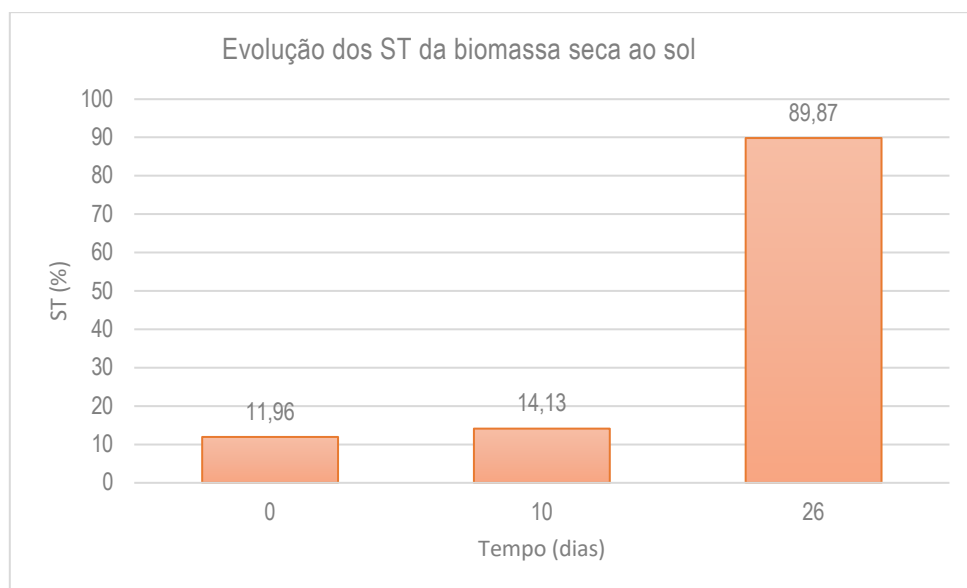


Figura 12: Evolução dos ST da biomassa seca ao sol ao longo do tempo de secagem.

De seguida apresentam-se os resultados das análises efetuadas ao chorume (pH, ST, SVT e SVT/ST para o ensaio 1; para o ensaio 2 a razão C/N foi analisada para o chorume para além dos parâmetros físico-químicos do ensaio 1), às polpas de JA, JA com chorume e dos digeridos obtidos tal como referido na secção anterior, neste caso, de forma independente sobre os ensaios 1 e 2.

Ensaio 1

Tabela 7: Análise físico-química dos substratos utilizados para o ensaio 1.

Amostra	ST (%)	SVT (%)	SVT/ST (%)	C (% ms)	N _{kj} (% ms)	C/N	CQO (g O ₂ /kg ms)
Polpa JA	5,69±0,12	4,32±0,10	76	44,00	2,6	17	92,38
Ch	4,06±0,02	3,32±0,01	82	47,54	4,1	12	---
Polpa JA+Ch	9,13±0,25	7,07±0,18	77	44,88	3,8	12	96,81

Analisando a tabela 7, verificamos que o teor de ST é mais elevado para o caso da polpa constituída por JA e chorume, isto é, a adição de chorume tornou a mistura mais rica quer em ST quer em SVT. Por outro lado, a razão SVT/ST aumentou, ainda que de forma ligeira, pelo facto de amostra de chorume ter uma razão de 82%.

A percentagem de carbono e de azoto têm comportamentos semelhantes entre si, tendo a polpa de JA as menores quantidades de carbono e azoto e o chorume as maiores quantidades de carbono e azoto. Relativamente à razão C/N, o chorume e a polpa de JA e chorume, possuem as razões mais baixas (12). A polpa de JA tem uma razão C/N mais próxima da gama recomendada, pelo que deverá ser conducente a um processo mais estável.

No sentido de avaliar se o pH estava na gama desejável para a DA e se teria havido acidificação, fez-se a leitura do pH inicial e final para cada modalidade estudada. Como se pode observar na tabela 8 os valores obtidos estão dentro do intervalo indicado para um processo estável (7 a 8),

Tabela 8: Análise da evolução do pH no ensaio 1.

Modalidade	pH inicial	pH final
E1CR	7,62	7,25±0,03
E1M1	7,24	7,31±0,08
E1M2	7,54	7,33±0,01
E1M3	7,56	7,18±0,06
E1M4	7,40	7,31±0,06

A análise do potencial redox dos digeridos permitiu avaliar se os mesmos se encontravam em anaerobiose, ou seja, com um potencial redox negativo. Como se conclui pela tabela 9, todos os reatores estavam sob condições anaeróbias, muito embora os valores determinados estejam acima do recomendado (< - 300 mv).

Tabela 9: Potencial Redox dos digeridos obtidos no ensaio 1.

Modalidades	Potencial redox (mV)
E1CR	-215,0±29,7
E1M1	-184,0±108,9
E1M2	-255,5±2,1
E1M3	-245,5±4,9
E1M4	-257,5±0,7

Como se pode verificar pela tabela 10 os digeridos ainda têm um teor de sólidos voláteis na ordem de 1g, este facto indica que nem toda a matéria orgânica foi bioconvertida em biogás.

Tabela 10: Caracterização do conteúdo em sólidos dos digeridos obtidos nas várias modalidades do ensaio 1.

Modalidade	ST (%)	SVT (%)	SVT/ST (%)
E1M1	1,35±0,08	0,98±0,06	72
E1M2	1,46±0,13	1,05±0,10	72
E1M3	1,37±0,04	0,98±0,05	71
E1M4	1,51±0,01	1,09±0,01	73

Ensaio 2

A tabela 11 apresenta a caracterização físico-química dos substratos do ensaio 2.

Tabela 11: Análise físico-química dos substratos utilizados para o ensaio 2.

Amostra	ST (%)	SVT (%)	SVT/ST (%)	C (% ms)	N _{kj} (% ms)	C/N
Polpa JA	5,37±0,52	4,12±0,46	77	44,50	3,09	14
Ch	2,58 ±0,001	2,07 ± 0,00	80	46,58	4,87	10
Polpa JA + Ch	4,09 ± 1,44	3,19 ± 1,10	78	45,63	4,52	10

Para o ensaio 2, pela análise direta da tabela 11, é possível concluir-se que a adição do chorume ao JA resulta numa polpa com um teor de ST e SVT inferior, isto porque o chorume tem menor quantidade destes sólidos. No entanto, obtém-se uma mistura com uma razão SVT/ST ligeiramente superior (78%). Ao nível da razão C/N é possível concluir-se que novamente a polpa de JA é novamente a mais equilibrada para produção de biogás em termos teóricos, enquanto a amostra constituída por chorume e a amostra da polpa de JA e chorume têm razões C/N mais distantes da gama recomendada para a DA.

De seguida apresentam-se as tabelas 12 e 13 relativas à análise do pH das misturas dos reatores antes e depois da DA, e o potencial redox que analisa o estado de anaerobiose, respetivamente.

Tabela 12: Análise da evolução do pH no ensaio 2.

Modalidades	pH inicial	pH final
E2CR	7,29	6,87±0,01
E2M1	6,64	6,89±0,03
E2M2	7,28	6,74±0,04
E2M3	6,93	6,88±0,03

Tabela 13: Potencial Redox dos digeridos obtidos no ensaio 2.

Modalidades	Potencial redox
E2CR	-137,0 ±18,6
E2M1	-188,7 ±13,3
E2M2	-137,3 ± 6,4
E2M3	-144,7 ± 41,3

Como se pode verificar, o pH embora ainda muito próximo de 7 parece indicar uma tendência para acidificação do meio. Por outro lado, os valores de potencial redox revelam que o meio estava em anaerobiose, no entanto parecem indicar alguma instabilidade pois estão acima do recomendado (-300 mv). Comparativamente com o ensaio 1, o processo do ensaio 2 parece ter sido menos estável.

Para o ensaio 2 avaliou-se a remoção de sólidos voláteis (tabela 15). Neste caso, quanto maior for a percentagem de remoção de sólidos voláteis ao nível da mistura colocada em reatores para digestão anaeróbia mais eficiente é o processo de bioconversão em biogás. Assim, pode afirmar-se que E2M1 é aquela em que ocorre uma bioconversão mais eficiente, o que está de acordo com o verificado em termos de produção de biogás, já que esta modalidade foi a que apresentou maior volume acumulado.

Tabela 14: Caracterização do teor de sólidos dos digeridos obtidos nas várias modalidades do ensaio 2.

Modalidade	ST (g em 350 mL)	SVT (g em 350 mL)	SVT/ST (%)
E2M1	1,76±0,03	1,14±0,00	65
E2M2	1,97±0,05	1,31±0,04	67
E2M3	1,74±0,09	1,17±0,05	67

Tabela 15: Remoção de SVT alcançadas nas diferentes modalidades testadas no ensaio 2.

Modalidades	Remoção de SVT (%)
E2M1	54,3
E2M2	19,0
E2M3	21,7

4.2 Determinação da produção teórica de biogás

Nesta secção expõem-se os valores obtidos através da aplicação das equações de Buswel explícitas na secção 3.5, cujos resultados se encontram explícitos na tabela 16.

Tabela 16: Coeficientes e resultados do cálculo teórico de produção de biogás e metano.

Análise elementar (% matéria seca)				nº moles				CHON coeficientes				B _{teórico} (mL/gSVT)	M _{teórico} (mL/gSVT)
C	H	O	N	C	H	O	N	a	b	c	d		
37,0	5,0	50,4	3,8	3,08	5,00	3,15	0,27	11	18	12	1	718	298

Pela análise direta da tabela 16 é possível comparar-se os valores obtidos de biogás e de metano calculados através das equações de Buswel com os apresentados pela bibliografia (tabela 3) é possível verificar-se que os valores propostos por O'Sullivan et al., 2010, Varanasi et al., 2017, (Chanathaworn, 2017) entre outros obtiveram valores consideravelmente menores de produção específica teórica quando comparados com os valores obtidos a partir das formulações de Buswel, enquanto os autores Castro and Agblevor, 2020^a e Castro and Agblevor, 2020^b obtiveram valores consideravelmente superiores de produção específica de metano possivelmente devido ao facto de terem aplicado uma nova tecnologia de produção de biogás/biometano em MIC. A percentagem de metano obtida teoricamente em comparação com o biogás teoricamente produzido foi de 41,43%. Este valor é baixo, mas está de acordo com o que é referido na bibliografia para o caso da mono-digestão.

4.3. Determinação experimental da produção de biogás

De seguida apresentam-se os gráficos de produção acumulada de biogás, obtidos em cada ensaio experimental bem como as tabelas com as respetivas da produção específica para cada modalidade testada.

Ensaio 1 (E1)

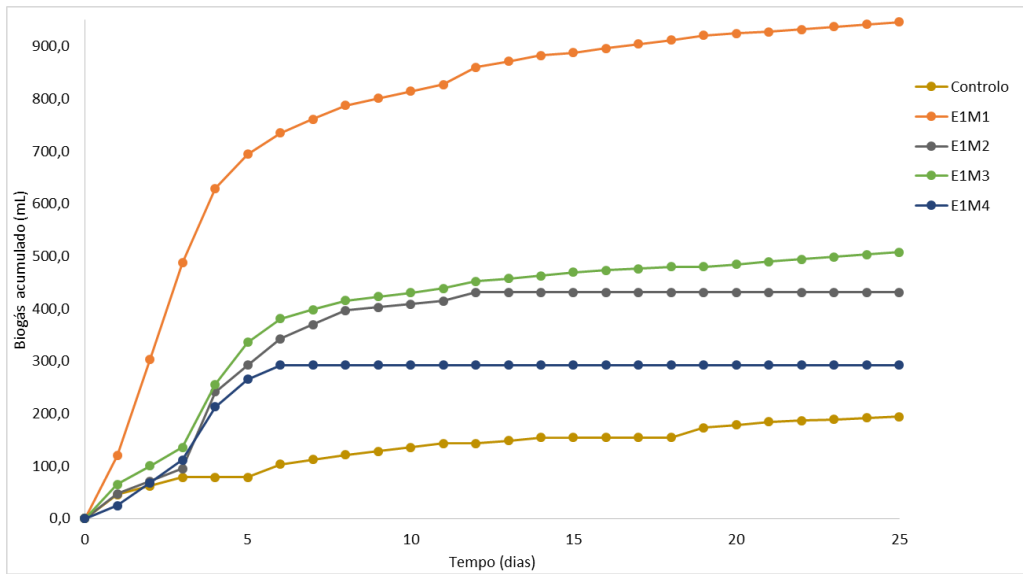


Figura 13: Biogás acumulado no decorrer do ensaio 1, por modalidade. Onde: E1M1 - Chorume (S:I 1:2); E1M2 - JA (S:I 1:2); E1M3 - JA (S:I 1:1); E1M4 - JA + Chorume (S:I 1:2).

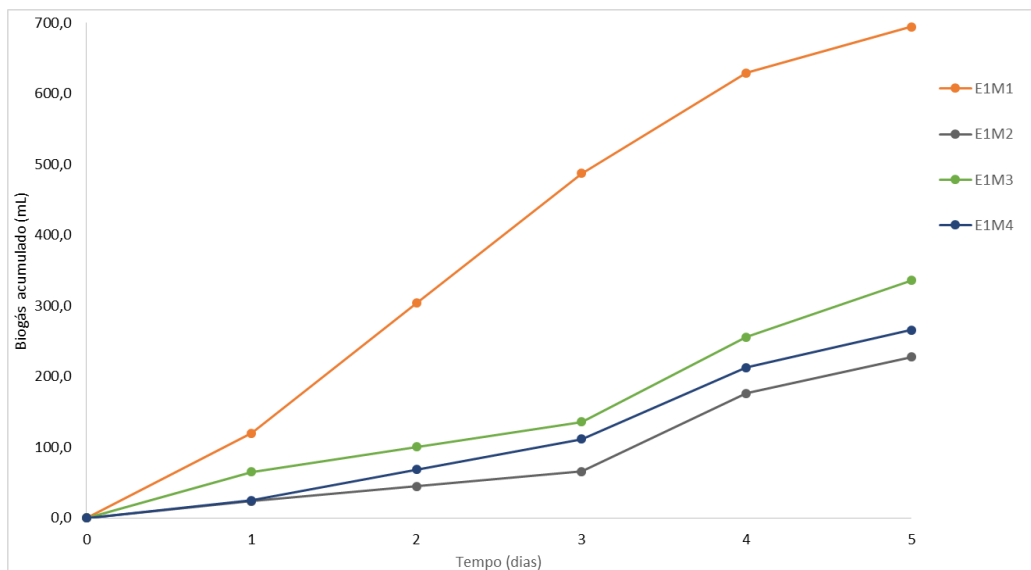


Figura 14: Perfil da curva de produção de biogás durante os primeiros 5 dias.

Através de análise direta da figura 13 é possível concluir-se que a modalidade E1M1, chorume com S:I de 1:2, teve uma maior facilidade de biodegradação, tal como se pode ver pelo maior declive do troço inicial da curva

(figura 14). Este facto indica que a etapa de hidrólise, que é a etapa limitante da DA, deve ter ocorrido com maior facilidade para esta modalidade. Provavelmente, isto deve-se a o chorume ter um conteúdo de matéria orgânica menos complexa e mais disponível para os microrganismos do que nos casos em que se introduz o jacinto de água. A comparação das curvas E1M1 e E1M2, respetivamente chorume e JA (ambos com S:I de 1:2), também suporta a afirmação anterior já que apesar do conteúdo em carbono não ser muito diferente (tabela 7) e a razão C/N até ser melhor no caso da polpa de JA, o processo de bioconversão foi menos eficiente para E1M2.

Tal como se pode observar na figura 14, a modalidade E1M4 (JA+Ch; S:I = 1:2) teve uma fase de adaptação menos pronunciada do que a modalidade E1M2 (JA; S:I = 1:2), o que parecia indicar um efeito sinérgico da mistura dos dois substratos. No entanto, como é visível na figura 13 e tabela 17, no final do período de digestão a produção acumulada de biogás da E1M4 é 25% inferior à da E1M2. Importava avaliar se o biogás gerado teria maior conteúdo em metano, o que poderia compensar o efeito do menor volume de produção. Infelizmente, no decorrer do trabalho tal não chegou a ser possível. Pelo cálculo do potencial de produção teórico (vide 4.2), que indicou que o biogás obtido a partir do JA teria uma qualidade da ordem dos 40%, seria de esperar que a codigestão tivesse um efeito benéfico a este nível.

Tendo em conta os resultados apresentados na tabela 17 a modalidade E1M1 é aquela cuja eficiência do processo de bioconversão é melhor, seguida da E1M2.

O estudo de O'Sullivan et al. (2010) obteve uma produção específica de biogás com uma mistura de alimentação formada por JA e estrume de 267 mL/g SVT e neste estudo a produção específica de biogás gerada pela mistura de JA+Ch foi de 189 mL/g SVT, cerca de 1,4 vezes inferior. Através do estudo realizado por (Castro and Agblevor, 2020b), que utilizou JA exclusivamente como substrato a diferentes razões S:I as produções específicas situaram-se entre os valores 290 para razões altas de S:I e os 493 ml/g SVT para razões baixas de S:I, isto é com maior conteúdo em sólidos voláteis, bastante similares e contidos nas diversas gamas de produção em que o JA fazia parte do substrato que compunha as misturas dos diversos reatores associados a E1M1 e E1M2.

Tabela 17: Biogás acumulado e produção específica de biogás do substrato no ensaio 1, por modalidade.

Modalidades	Biogás Acumulado (mL)	Produção Biogás Específica (mL/g SVT Substrato)
E1M1	946,6	752,3
E1M2	431,3	237,0
E1M3	507,5	208,8
E1M4	292,6	189,0

Outra análise que importa fazer é a do efeito da razão S:I na eficiência de bioconversão. Assim, comparando o desempenho das modalidades que contêm a polpa de JA, E1M2 (S:I de 1:2) e E1M3 (S:I de 1:1), verifica-se que a E1M2 tem uma produção específica cerca de 14% superior, indicando uma maior eficiência do processo.

Ensaio 2 (E2)

A figura 15 apresenta as curvas de produção de biogás ao longo do ensaio 2.

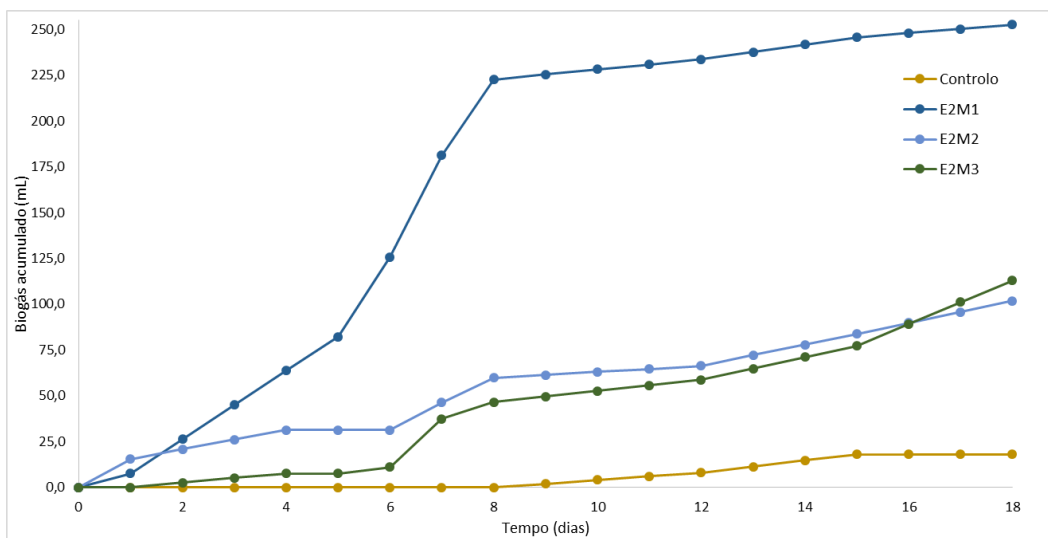


Figura 15: Biogás acumulado no decorrer do ensaio 2, por modalidade. Onde: E2M1-Ch; E2M2-JA; E2M3-JA+Ch, todos S:I de 1:2.

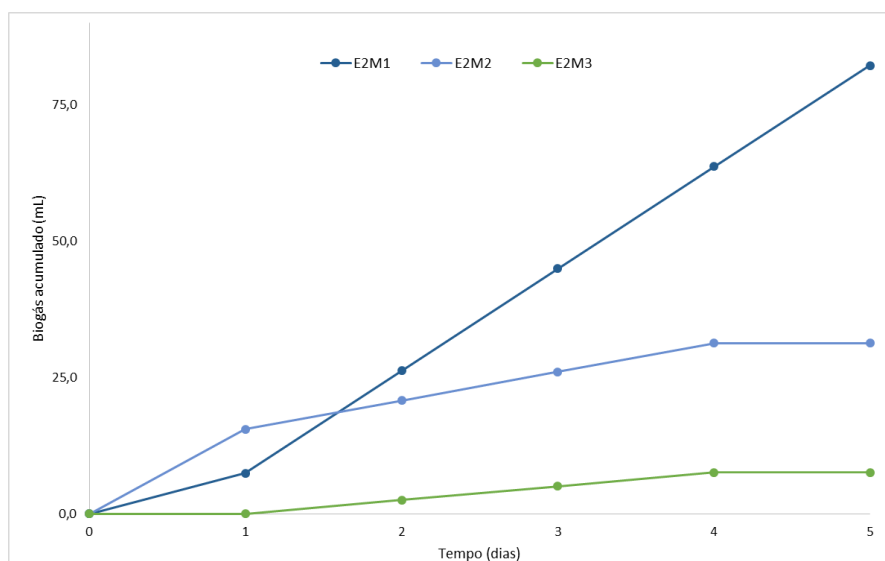


Figura 16: Perfil da curva de produção de biogás durante os primeiros 5 dias.

Analisando de forma comparativa as modalidades ao nível da produção de biogás é possível concluir que a modalidade que contém o chorume (E2M1) tem a maior acumulação de biogás comparativamente com as modalidades 2 e 3, respeitantes, às que contém os substratos de JA e JA+Ch, respetivamente, as quais têm um volume de biogás acumulado de cerca de metade da gerada pelo reator que contém o chorume.

Comparando E2M2 e E2M3, tal como visível na tabela 18, a adição de chorume aumentou 12% o volume de biogás acumulado e em cerca de 20% a produção específica de biogás.

Tabela 18: Biogás acumulado e produção específica de biogás do substrato no ensaio 2, por modalidade.

Modalidades	Biogás Acumulado (mL)	Produção Específica (mL/g SVT Substrato)
E2M1	252,7	167,0
E2M2	101,0	64,2
E2M3	113,0	76,9

Para o ensaio 2 obtiveram-se produções acumuladas de biogás medianas tendo em conta os estudos apresentados na tabela 3, tal como indica O'Sullivan et al., 2010 com produção acumulada de 0,5 L. Também se torna necessário salientar que a maior produção ocorreu ao nível do chorume tal como se verificou no ensaio 1. Comparando os resultados dos ensaios 1 e 2 é possível concluir-se que a produção de biogás e a produção específica foram superiores no ensaio 1. Este resultado está de acordo com as diferenças evidenciadas pelos valores dos parâmetros pH e potencial redox de ambos os ensaios, que sugerem um processo menos estável no ensaio 2. De facto, tal como se observa na tabela 12, os valores de pH dos digeridos do ensaio 2 são inferiores ao do 1, na gama de 6,8 e 7,3, respetivamente. Por outro lado, os digeridos do ensaio 2 apresentavam potenciais redox superiores aos do ensaio 1, e acima do valor recomendado.

O potencial teórico de produção de biogás a partir do JA (718 mL/g SVT) está muito acima dos resultados alcançados experimentalmente, em que no melhor caso foi possível obter 237 mL/g SVT da polpa (o que corresponde a cerca de 198,5 mL/g SVT de JA). É comum o potencial determinado experimentalmente corresponder a cerca de 80% do estimado teoricamente (o que neste caso corresponderia a 574,4 mL/g SVT), já que nem todo o carbono presente no substrato pode ser convertido pelos microrganismos. Pensa-se que o desvio encontrado tem a ver com o facto de o processo realizado necessitar de otimização por forma a ser mais estável, por exemplo atuando ao nível da mistura reacional com vista a aumentar a razão C/N. Seria também importante avaliar a alcalinidade, por forma a verificar o poder tampão da alimentação, e garantir um potencial redox dentro do recomendado. Por outro lado, devem realizar-se mais ensaios que permitam avaliar a qualidade do biogás obtido, e assim suportar a tomada de decisões relativamente às melhores condições operacionais.

5. Conclusões

Os resultados obtidos, embora preliminares, permitem concluir que a biomassa de JA tem potencial para valorização energética por digestão anaeróbia. No entanto, considera-se que é necessário realizar mais ensaios laboratoriais, por forma a definir as melhores condições operacionais. De facto, o período disponível para a realização da componente laboratorial ficou reduzido devido às limitações associadas à Covid-19 e, para além disso, o delineamento e montagem do sistema de DA em *batch* só permitiu que o primeiro ensaio fosse realizado no início de junho.

Por outro lado, seria interessante fazer uma caracterização mais exaustiva da biomassa e testar diferentes proporções de mistura JA : chorume.

Importa referir que o pré-tratamento de JA por secagem solar revelou ser uma boa estratégia para concentrar o teor de sólidos voláteis, enriquecendo a mistura de alimentação.

A estratégia proposta permitiria melhorar a qualidade dos ecossistemas dos cursos de água através da eliminação de uma planta infestante e aproveitando-se as águas residuais produzidas pela indústria pecuária. Esta opção poderia vir a ter impactes positivos no setor energético, pela distribuição deste biogás após ser purificado na rede de gás natural, ou sua comercialização para o setor automóvel e industrial. Por outro lado, haveria a mitigação das emissões de metano associadas aos efluentes pecuários.

Desta forma, poder-se-ia contribuir para a sustentabilidade do processo de controlo desta planta infestante, o que poderá ter grande impacto também ao nível social nas áreas afetadas por esta invasora.

6. Bibliografia

- <https://www.hisour.com/pt/eichhornia-crassipes-41042/> (18/10/2021)
- <https://www.invasoras.pt/pt/planta-invasora/eichhornia-crassipes> (18/10/2021)
- Aghbashlo, M., 2019. Prognostication of lignocellulosic biomass pyrolysis behavior using ANFIS model tuned by PSO algorithm 10.
- Ajithram, A., Jappes, J.T.W., Brintha, N.C., 2020. Water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) natural composite extraction methods and properties – A review. *Mater. Today* 7.
- Anukam, A., Mohammadi, A., Naqvi, M., Granström, K., 2019. A Review of the Chemistry of Anaerobic Digestion: Methods of Accelerating and Optimizing Process Efficiency. *Processes* 7, 504. <https://doi.org/10.3390/pr7080504>
- Bergier, I., Salis, S.M., Miranda, C.H.B., Ortega, E., Luengo, C.A., 2012. Biofuel production from water hyacinth in the Pantanal wetland. *Ecohydrol. Hydrobiol.* 12, 77–84. <https://doi.org/10.2478/v10104-011-0041-4>
- Brown, A.E., Adams, J.M.M., Grasham, O.R., Camargo-Valero, M.A., Ross, A.B., 2020. An Assessment of Different Integration Strategies of Hydrothermal Carbonisation and Anaerobic Digestion of Water Hyacinth. *Energies* 13, 5983. <https://doi.org/10.3390/en13225983>
- C. Roati, B. Ruffino, F. Marchese, D. Novarino and M.C. Zanetti, F. Marchese, D. Novarino and M.C. Zanetti, 2012. Preliminary Evaluation of the Potential Biogas Production of Food-Processing Industrial Wastes. *Am. J. Environ. Sci.* 8, 291–296. <https://doi.org/10.3844/ajessp.2012.291.296>
- Carlini, M., Castellucci, S., Mennuni, A., 2018. Water hyacinth biomass: chemical and thermal pre-treatment for energetic utilization in anaerobic digestion process. *Energy Procedia* 148, 431–438. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.106>
- Castro, Y.A., Agblevor, F.A., 2020a. Biomethanation of invasive water hyacinth from eutrophic waters as a post weed management practice in the Dominican Republic: a developing country. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 27, 14138–14149. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07927-w>
- Castro, Y.A., Agblevor, F.A., 2020b. Interaction effect of high feed to inoculum ratio (F/I) and temperature on the biomethanation kinetics of water hyacinth. *SN Appl. Sci.* 2, 1818. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03626-w>
- Chanathaworn, J., 2017. Operating condition optimization of water hyacinth and earthworm bedding wastewater for biogas production. *Energy Procedia* 138, 253–259. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.049>
- Collet, C., Adler, N., SchwitzgueÄbel, J.-P., PeÄringer, P., 2004. Hydrogen production by *Clostridium thermolacticum* during continuous fermentation of lactose. *Int. J. Hydrog. Energy* 7.
- Drosig, B., 2013. Process monitoring in biogas plants 38.

- Gaurav, G.K., Mehmood, T., Cheng, L., Klemeš, J.J., Shrivastava, D.K., 2020. Water hyacinth as a biomass: A review. *J. Clean. Prod.* 277, 122214. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122214>
- Güereña, D., Neufeldt, H., Berazneva, J., Duby, S., 2015. Water hyacinth control in Lake Victoria: Transforming an ecological catastrophe into economic, social, and environmental benefits. *Sustain. Prod. Consum.* 3, 59–69. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2015.06.003>
- Levin, D.B., Islam, R., Cicek, N., Sparling, R., 2006. Hydrogen production by *Clostridium thermocellum* 27405 from cellulosic biomass substrates. *Int. J. Hydrog. Energy* 8.
- Liu, Jianfeng, Huang, J., Li, F., Zhao, X., Yin, F., Yang, B., Liu, Jing, Yang, H., Zhang, W., 2020. Comparison of long-term energy efficiency and microbial community dynamics of different reactors in response to increased loadings of water hyacinth juice. *Sci. Total Environ.* 744, 140812. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140812>
- Magnusson, L., Islam, R., Sparling, R., Levin, D., Cicek, N., 2008. Direct hydrogen production from cellulosic waste materials with a single-step dark fermentation process. *Int. J. Hydrog. Energy* 33, 5398–5403. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.06.018>
- Meegoda, J., Li, B., Patel, K., Wang, L., 2018. A Review of the Processes, Parameters, and Optimization of Anaerobic Digestion. *Int. J. Environ. Res. Public. Health* 15, 2224. <https://doi.org/10.3390/ijerph15102224>
- Mitchell, D.S.M., Kennedy, N., Ma, D.J., 2015. ANAEROBIC DIGESTION EFFLUENTS AND PROCESSES: THE BASICS.
- O'Sullivan, C., Rounsefell, B., Grinham, A., Clarke, W., Udy, 2010. Anaerobic digestion of harvested aquatic weeds: water hyacinth (*Eichhornia crassipes*), cabomba (*Cabomba Caroliniana*) and salvinia (*Salvinia molesta*). *C O* 10.
- O-Thong, S., Prasertsan, P., Karakashev, D., Angelidaki, I., 2008. Thermophilic fermentative hydrogen production by the newly isolated *Thermoanaerobacterium thermosaccharolyticum* PSU-2. *Int. J. Hydrog. Energy* 33, 1204–1214. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.12.015>
- Pham, T.H., Rabaey, K., Aelterman, P., Clauwaert, P., De Schampelaire, L., Boon, N., Verstraete, W., 2006. Microbial Fuel Cells in Relation to Conventional Anaerobic Digestion Technology. *Eng. Life Sci.* 6, 285–292. <https://doi.org/10.1002/elsc.200620121>
- Rathod, V.P., Bhale, P.V., Mehta, R.S., Harmani, K., Bilimoria, S., Mahida, A., Champaneri, H., 2018. Biogas Production from Water Hyacinth in the Batch type Anaerobic Digester. *Mater. Today Proc.* 5, 23346–23350. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.11.072>
- Rezania, S., Ponraj, M., Din, M., Songip, A., Sairan, F., Chelliapan, 2015. The diverse applications of water hyacinth with main focus on sustainable energy and production for new era_ An overview. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 12.
- Shah, F.A., Mahmood, Q., Rashid, N., Pervez, A., Iqbal, A., Shah, M.M., 2015. Anaerobic Digestion of

Water Hyacinth, Giant Reed, Maize and Poultry Waste for Biogas Generation 8.

- Sindhu, R., Binod, P., Pandey, A., Madhavan, A., Alphonsa, J.A., Vivek, N., Gnasounou, E., Castro, E., Faraco, V., 2017. Water hyacinth a potential source for value addition: An overview. *Bioresour. Technol.* 11.
- Soltanian, S., Aghbashlo, M., Almasi, F., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Nizami, A.-S., Ok, Y.S., Lam, S.S., Tabatabaei, M., 2020. A critical review of the effects of pretreatment methods on the exergetic aspects of lignocellulosic biofuels. *Energy Convers. Manag.* 212, 112792. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112792>
- Su, W., Sun, Q., Xia, M., Wen, Z., Yao, Z., 2018. The Resource Utilization of Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes* [Mart.] Solms) and Its Challenges. *Resources* 7, 46. <https://doi.org/10.3390/resources7030046>
- Varanasi, J.L., Kumari, S., Das, D., 2017. Improvement of energy recovery from water hyacinth by using integrated system. *Int. J. Hydrog. Energy* 16.
- Wilson, J.R.U., Ajuonu, O., Center, T.D., Hill, M.P., Julien, M.H., Katagira, F.F., Neuenschwander, P., Njoka, S.W., Ogwang, J., Reeder, R.H., 2007. The decline of water hyacinth on Lake Victoria was due to biological control by *Neochetina* spp. *Aquat. Bot.* 4.

